



TUGAS AKHIR - TF141581

**PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL*
PADA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR DESUPERHEATER
PABRIK III PLANT PA B PT PETROKIMIA GRESIK
DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR TEMPERATUR**

Haris Dwi Happy Putra
NRP 2413 100 001

Dosen Pembimbing
Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes
NIP. 19571126 198403 2 002

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TF141581

***DESIGN OF ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL
ON TEMPERATUR CONTROL SYSTEM DESUPERHEATER
AT PABRIK III PLANT PA B PT PETROKIMIA GRESIK
WITH FAULT AT TEMPERATURE SENSOR***

Haris Dwi Happy Putra
NRP 2413 100 001

Dosen Pembimbing
Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes
NIP. 19571126 198403 2 002

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Haris Dwi Happy Putra

NRP : 2413100001

Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul **“Perancangan *Active Fault Tolerant Control* Pada Sistem Pengendalian Temperatur Desuperheater Pabrik III Plant PA B PT Petrokimia Gresik Dengan Kesalahan Pada Sensor Temperatur”** adalah bebas plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Surabaya, 20 Juli 2017
Yang membuat pernyataan,



Haris Dwi Happy Putra

LEMBAR PENGESAHAN

**PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL*
PADA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR
DESUPERHEATER PABRIK III PLANT PA B
PT PETROKIMIA GRESIK DENGAN KESALAHAN PADA
SENSOR TEMPERATUR**

TUGAS AKHIR

Oleh:

Haris Dwi Happy Putra
NRP. 2413 100 001

Surabaya, Juli 2017
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing



Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes
NIP. 19571126 198403 2 002

Ketua Departemen
Teknik Fisika, FTI-ITS



Agus Muhammad Hatta, ST, MSi, Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* PADA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR DESUPERHEATER PABRIK III PLANT PA B PT PETROKIMIA GRESIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR TEMPERATUR

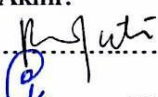


TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Haris Dwi Happy Putra
NRP 2413 100 001

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes..........(Pembimbing)
2. Hendra Cordova, ST.M..........(Ketua Tim Penguji)
3. Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D..........(Penguji I)

**SURABAYA,
Juli 2017**

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* PADA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR DESUPERHEATER PABRIK III PLANT PA B PT PETROKIMIA GRESIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR TEMPERATUR

Nama Mahasiswa : Haris Dwi Happy Putra
NRP : 2413100001
Departemen : Teknik Fisika, FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes

ABSTRAK

Desuperheaterisasi adalah proses menurunkan suhu uap dengan cara menginjeksikan air pendingin ke dalamnya. Proses ini terjadi dalam sebuah wadah yang disebut *desuperheater*. Ini bertujuan agar suhu *steam* yang akan masuk ke *heat exchanger* (E-2501) sesuai dengan temperatur desainnya yaitu sebesar 139°C. Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) yang mampu mentolerir suatu kesalahan kecil yang terjadi pada sensor temperatur pada *plant* ini yaitu temperatur *transmitter desuperheater*. Langkah pertama yaitu menentukan fungsi transfer model matematis dari *plant Desuperheater* dan *control valve* TCV-2509. Langkah kedua yaitu merancang kontrol PID. Langkah ketiga yaitu merancang observer dan rekonfigurasi sinyal kontrol untuk AFTC. Dari simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa dari uji kesalahan sensor bias dan sensitivitas, kontrol AFTC mampu mengakomodasi kesalahan sensor lebih baik dibandingkan dengan kontrol PID.

Kata kunci : Active Fault Tolerant Control, Desuperheater, Sensor, PID

DESIGN OF ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL ON TEMPERATUR CONTROL SYSTEM DESUPERHEATER AT PABRIK III PLANT PA B PT PETROKIMIA GRESIK WITH FAULT AT TEMPERATURE SENSOR

Name of Student : Haris Dwi Happy Putra
NRP : 2413100001
Department : Teknik Fisika, FTI-ITS
Supervisor : Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes

ABSTRACT

Desuperheaterization is the process of lowering the temperature of the steam by injecting cooling water into it. This process occurs in a container called desuperheater. It holds for the steam temperature to enter the heat exchanger (E-2501) according to the design temperature of 139 ° C. In this final project, the design of Active Fault Tolerant Control (AFTC) is able to tolerate a small error that occurs in the temperature sensor at this plant is the temperature of the desuperheater transmitter. The first step is the transfer function of the mathematical model of the Desuperheater plant and the control valve TCV-2509. The second step is control PID control. The third step is to create an observer and reconfigure the control signal for AFTC. From the simulation that has been done is shown from the result of sensor test of bias and sensitivity, AFTC control able to accommodate sensor better than PID control.

Keywords : Active Fault Tolerant Control, Desuperheater, Sensor, PID

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir beserta pembuatan laporan yang berjudul :

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* PADA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR DESUPERHEATER PABRIK III PLANT PA B PT PETROKIMIA GRESIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR TEMPERATUR

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan bagi seorang mahasiswa untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan kali ini penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu hingga terselesainya laporan Tugas Akhir ini, khususnya kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D selaku ketua Departemen Teknik Fisika, FTI – ITS.
2. Hapi (Ayah), Suyati (Ibu), Hendra Adi Irawan (Kakak Tercinta) selaku keluarga penulis yang tiada hentinya memberikan doa, semangat, serta motivasi kepada penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
3. Ibu Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu mengarahkan dan membimbing penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
4. Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku dosen wali yang memberi motivasi kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Fisika.
5. Seluruh teman Tugas Akhir (Charis, Angga, Pep, Situm, Ilham, Aldy, Bimo) terima kasih untuk semua kerja sama dan kebersamaannya.

6. Seluruh karyawan, dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sangat menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan untuk menyempurnakan laporan Tugas Akhir ini.

Surabaya , Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Desuperheater	5
2.2 Sistem Kontrol pada <i>Desuperheater</i>	5
2.3 Pemodelan Dinamik <i>Desuperheater</i>	7
2.4 <i>Fault Tolerance Control</i>	8
2.5 Observer State	10
2.6 Penentuan <i>Gain Observer</i>	13
2.7 Skema Rekonfigurasi Kontrol	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Pengambilan Data <i>Plant</i>	18
3.1.1 Data Spesifikasi dan Dimensi <i>Desuperheater</i>	18
3.1.2 Data Kesalahan Pada Sensor Temperatur	20
3.2 Pemodelan Matematis Aktuator (TCV 2509)	21
3.3 Pemodelan Matematis <i>Plant Desuperheater</i>	23
3.4 Validasi Pemodelan	24
3.5 Perancangan Pengendali <i>Proportional Integral</i> <i>Derivative (PID)</i>	25
3.6 Perancangan <i>Active Fault Tolerant Control</i>	27
3.6.1 Perancangan <i>Observer</i>	27

3.6.2	Rekonfigurasi Sinyal Kontrol untuk Sensor	29
3.7	Uji Performansi.....	31
BAB IV ANALISA DATA		33
4.1	Hasil Perancangan Simulasi AFTC	33
4.2	Uji Kesalahan <i>Bias</i>	33
4.2.1	Uji Kesalahan <i>Bias</i> +5%	33
4.2.2	Uji Kesalahan <i>Bias</i> -5%	35
4.2.3	Uji Kesalahan <i>Bias</i> +10%	37
4.2.4	Uji Kesalahan <i>Bias</i> -10%	38
4.3	Uji Kesalahan Sensitifitas.....	40
4.3.1	Uji Kesalahan Sensitifitas 96%	41
4.3.2	Uji Kesalahan Sensitifitas 92%	42
4.3.3	Uji Kesalahan Sensitifitas 88%	44
4.3.4	Uji Kesalahan Sensitifitas 84%	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		49
5.1	Kesimpulan.....	49
5.2	Saran	49
DAFTAR PUSTAKA.....		51
LAMPIRAN A		
LAMPIRAN B		
LAMPIRAN C		
LAMPIRAN D		
LAMPIRAN E		
LAMPIRAN F		
LAMPIRAN G		
LAMPIRAN H		
LAMPIRAN I		
LAMPIRAN J		
LAMPIRAN K		
LAMPIRAN L		
LAMPIRAN M		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 P&ID Desuperheater E-2506 (Petrokimia,2017).....	5
Gambar 2. 2 Diagram Blok Kontroler PID [5].....	6
Gambar 2. 3 Kesenjangan Energi [7].....	7
Gambar 2. 4 Skema Sistem FTC (Noura, 2009)	8
Gambar 2. 5 Struktur Umum <i>Active Fault Tolerant Control</i> [9].	10
Gambar 2. 6 <i>Observer state</i> (Indriawati, 2015).....	14
Gambar 2. 7 Skema Rekonfigurasi Kontrol [8].....	15
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Pengerjaan Tugas Akhir.....	18
Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem Pengendalian <i>Feedback</i> Pada <i>Desuperheater</i>	20
Gambar 3. 3 Grafik Kesalahan Sensor TT-2509	21
Gambar 3. 4 Skema Perancangan Simulasi Aktuator.....	22
Gambar 3. 5 Respon Simulasi Aktuator	22
Gambar 3. 6 Skema Perancangan Model <i>Open Loop Plant</i> dan Aktuator.....	24
Gambar 3. 7 Grafik Validasi Model dengan <i>Open Loop</i>	25
Gambar 3. 8 Skema Diagram Blok Perancangan Pengendali PID	26
Gambar 3. 9 Grafik Respon Perancangan Kontroler PID	26
Gambar 3. 10 Skema Rekonfigurasi Sinyal Kontrol dari	30
Gambar 4. 1 Grafik Respon Kesalahan Bias +5%	34
Gambar 4. 2 Grafik Perbesaran Kesalahan Bias +5%	34
Gambar 4. 3 Grafik Respon Kesalahan Bias -5%	35
Gambar 4. 4 Grafik Perbesaran Kesalahan Bias -5%	36
Gambar 4. 5 Grafik Respon Kesalahan Bias +10%	37
Gambar 4. 6 Grafik Perbesaran Kesalahan Bias +10%	38
Gambar 4. 7 Grafik Respon Kesalahan Bias -10%	39
Gambar 4. 8 Grafik Perbesaran Kesalahan Bias -10%	39
Gambar 4. 9 Respon Sistem dengan Kesalahan Sensitivitas 96%	41
Gambar 4. 10 Grafik Perbesaran Respon Sistem dengan Kesalahan Sensitivitas 96% pada detik ke-60.....	41
Gambar 4. 11 Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 92%	43

Gambar 4. 12 Grafik Perbesaran Respon Sistem dengan
Kesalahan Sensitifitas 92% pada detik ke-6043

Gambar 4. 13 Respon Sistem dengan kesalahan sensitifitas 88%
.....45

Gambar 4. 14 Grafik Perbesaran Respon Sistem dengan
Kesalahan Sensitifitas 88% pada detik ke-6045

Gambar 4. 15 Respon Sistem dengan kesalahan sensitifitas 84%
.....47

Gambar 4. 16 Grafik Perbesaran Respon Sistem dengan
Kesalahan Sensitifitas 88% pada detik ke-6047

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Data Pemodelan Plant	19
Tabel 4. 1 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias +5% saat dikenai Kesalahan pada Detik ke-60	35
Tabel 4. 2 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias -5% saat dikenai Kesalahan pada Detik ke-60	36
Tabel 4. 3 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias +10% saat dikenai Kesalahan pada Detik ke-60	38
Tabel 4. 4 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias -10% saat dikenai Kesalahan pada Detik ke-60	40
Tabel 4. 5 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitifitas 96% pada Kondisi diberi Kesalahan	42
Tabel 4. 6 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitifitas 92% pada Kondisi diberi Kesalahan	44
Tabel 4. 7 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitifitas 88% pada Kondisi diberi Kesalahan	46
Tabel 4. 8 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitifitas 84% pada Kondisi diberi Kesalahan	48

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Petrokimia Gresik merupakan industri bergerak dalam sektor produsen penghasil berbagai jenis pupuk. Dalam menghasilkan produknya, industri ini menggunakan bahan baku untuk diproses menjadi suatu produk. Produk utama dari industri adalah pupuk nitrogen dan pupuk fosfat. Industri ini membutuhkan bahan baku utama berupa ammonia, asam sulfat, dan asam fosfat dalam proses pembuatan pupuk [1].

Salah satu proses produksi di pabrik III terdapat suatu *plant* yakni *desuperheater* yang merupakan salah satu peralatan yang dibutuhkan dalam pembuatan asam fosfat dimana dalam proses kontrolnya meliputi pengendalian temperatur. Temperatur steam yang akan menuju *desuperheater* di turunkan suhunya sesuai setpoint yaitu 139⁰C [2].

Sensor dan aktuator merupakan komponen yang paling mudah rusak karena terletak dilapangan dan langsung berhubungan dengan lingkungan. Berbeda dengan kontroler yang diletakkan di tempat terlindung. Pada sistem kontrol yang terdapat di industri atau sistem kontrol dimanapun, solusi yang digunakan adalah perawatan dan *maintenance* secara rutin untuk menghindari terjadinya kesalahan yang dilakukan oleh komponen sensor dan aktuator. Salah satu penyebab trip adalah kesalahan pembacaan pada sensor atau aktuator [3]. Pada tugas akhir ini yang digunakan adalah sensor temperature (TT-2509).

Teknologi untuk mengatasi kesalahan sensor atau aktuator terus dikembangkan dengan desain *Fault Tolerant Control*. Desain toleransi kesalahan ini memungkinkan untuk mempertahankan kestabilan sistem pada saat terjadi kesalahan pada komponen sensor atau aktuator [4], sehingga untuk melakukan *maintenance* tidak terlalu sering.

Fault tolerant control merupakan suatu perkembangan teknologi untuk kebutuhan *safety* dan perbaikan unjuk kerja. Pada *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) terdiri dari 2 tahapan, yaitu

adanya *Fault Detection and Identification* (FDI) dan rekonfigurasi kontrol [4]. Pada Tugas Akhir ini akan dilakukan perancangan *Active Fault Tolerant Control* pada sistem pengendalian temperatur di *Desuperheater* Pabrik III Plant PA B PT Petrokimia Gresik dengan kesalahan sensor. Kesalahan sensor tersebut dapat disebabkan oleh kesalahan sensitifitas dan perubahan *range* (bias). Diharapkan AFTC mampu menoleransi malfungsi yang terjadi pada sistem pengendalian temperatur di *desuperheater* dan mampu menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan dengan pengendali PID.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun masalah penelitian yang diangkat dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana merancang sistem AFTC pada *Desuperheater* Pabrik III Plant PA B PT Petrokimia Gresik Jawa Timur dengan kesalahan pada sensor temperatur?
- b. Bagaimana perbandingan performansi dari respon sistem pengendali PID dan AFTC?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Pemodelan *plant* yang ditinjau hanya pada *Desuperheater* Pabrik III Plant PA B PT Petrokimia Gresik Jawa Timur.
- b. Kesalahan sensor yang dianalisa hanya kesalahan pembacaan pada sensor temperatur yang ditunjang dari kesalahan sensitivitas dan bias.
- c. Besaran yang dijaga nilainya agar tetap adalah nilai temperatur ($^{\circ}\text{C}$) dan besaran yang diubah-ubah adalah nilai laju aliran *spray water* (kg/s).
- d. Data validasi diambil pada tanggal 21 Maret-23 Maret 2017.
- e. Sistem kontrol yang digunakan pada sitem pengendalian temperatur di *desuperheater* menggunakan algoritma PID.
- f. *Design Fault Tolerant Control* dilakukan dengan simulasi software *MATLAB 2013b*.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

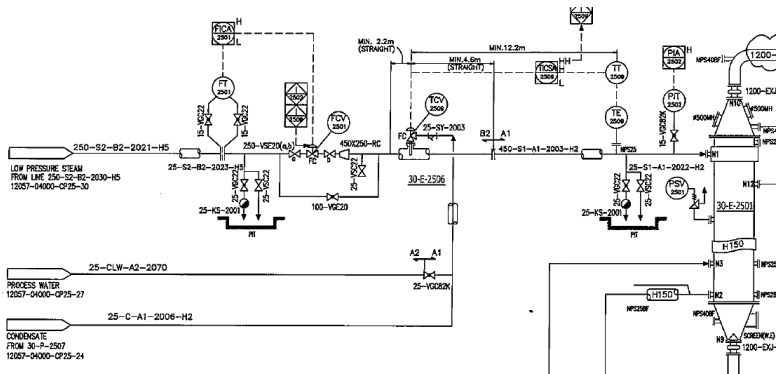
- a. Merancang AFTC pada *Desuperheater* Pabrik III Plant PA B PT Petrokimia Gresik dengan kesalahan pada sensor temperatur.
- b. Membandingkan respon sistem AFTC dan PID dalam meningkatkan performansi sistem dengan uji kesalahan pada sensor.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II DASAR TEORI

2.1 Desuperheater

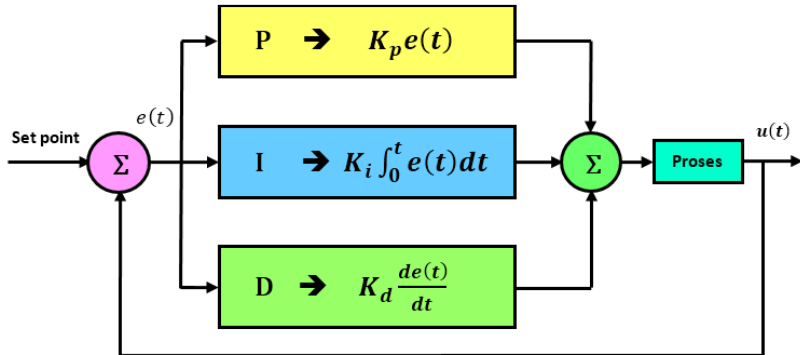
Desuperheaterisasi adalah proses menurunkan suhu uap dengan cara menginjeksikan air pendingin ke dalamnya. Proses ini terjadi dalam sebuah wadah yang disebut desuperheater [2]. Ini bertujuan agar suhu steam yang akan masuk ke heat exchanger (E-2501) sesuai dengan temperatur desainnya yaitu sebesar 139 °C. Air pendingin memiliki karakteristik tetap yaitu temperatur 133,5 °C. Berikut ini P&ID Desuperheater 30-E-2506.



Gambar 2. 1 P&ID Desuperheater E-2506 (Petrokimia,2017)

2.2 Sistem Kontrol pada Desuperheater

Sistem kontrol pada pengendalian temperature Desuperheater ini menggunakan PID kontroller sebagai pengedalnya. PID (*Proportional Integral Derivative*) kontroller merupakan kontroller untuk menentukan suatu kestabilan atau kepresisian sistem instrumentasi dengan adanya *feedback* atau umpan balik pada sistem tersebut. Komponen PID ada tiga jenis yaitu *proportional*, *integral*, dan *derivative*, ketiga komponen tersebut bias digunakan secara bersamaan atau sendiri-sendiri tergantung respon yang kita inginkan dari plant tersebut.



Gambar 2. 2 Diagram Blok Kontroler PID [5]

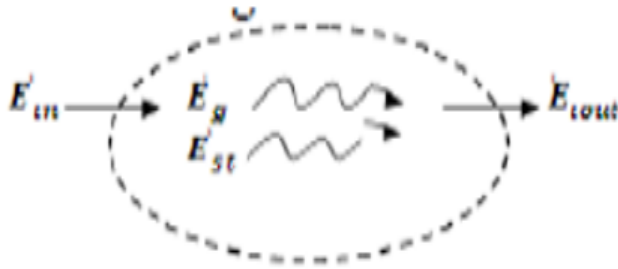
Berdasarkan **Gambar 2.2** dapat diketahui bahwa kontrol proportional digunakan sebagai penguat atau pembesar sinyal sehingga dapat mencapai *set point* atau hasil yang diinginkan. Output *proportional* adalah hasil perkalian antara konstanta *proportional* (K_p) dengan nilai *error* yang dihasilkan. Kontrol ini selalu menghasilkan *error* (*input control unit*) untuk menghasilkan sinyal yang keluar dari controller (*outout control unit*). Oleh karena itu, kekurangan dari kontrol *proportional* yang selalu meninggalkan *offset* diperbaiki oleh kontrol integral untuk menghilangkan *offset* tersebut. Akan tetapi kemampuan kontrol ini untuk menghilangkan *offset* tidak disertai dengan kemampuan respon secara cepat, sehingga menjadi cocok kalau kontrol PID digunakan untuk variabel temperature. Upaya memperbaiki respon didapatkan dengan menggunakan kontrol *derivative* [5].

Sistem Pengendalian temperature pada Desuperheater menggunakan sistem kontrol *proportional integral derivative* (PID) yang terintegrasi dalam *distributed control system* (DCS). Di dalam *control room*, *human machine interface* (HMI) akan memberikan penunjukan nilai temperatur hasil pengukuran dari *temperatur transmitter*. Pengendalian temperatur yang dimaksudkan disini adalah menjaga temperatur tetap pada *set point* dengan memanipulasi laju aliran *spray water* yang berasal dari

kondensor. Jika temperatur yang terukur melebihi *set point*, maka laju aliran *spray water* akan ditambah, dan sebaliknya [2].

2.3 Pemodelan Dinamik *Desuperheater*

Pada *desuperheater* pemodelan matematisnya dicari menggunakan pendekatan hukum kesetimbangan energi (energy balance) dimana energi yang masuk sama dengan energi yang keluar ditambah dengan energi yang tersimpan dalam sistem [6].



Gambar 2. 3 Kestimbangan Energi [7]

$$E_{in} + E_g - E_{out} = \frac{dE_{st}}{dt} E_{st} \quad (2.1)$$

$$E_{in} + E_g - E_{out} = E_{st} \quad (2.2)$$

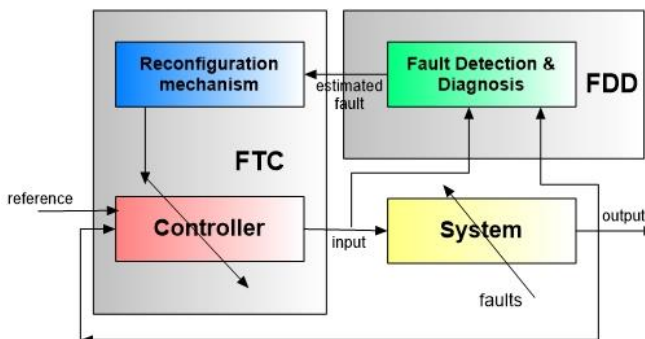
Total Energy Balance

$$\frac{\left[\begin{array}{c} \text{akumulasi} \\ \text{energi total} \end{array} \right]}{\text{waktu}} = \frac{\left[\begin{array}{c} \text{Energi total} \\ \text{input} \end{array} \right]}{\text{waktu}} - \frac{\left[\begin{array}{c} \text{Energi total} \\ \text{output} \end{array} \right]}{\text{waktu}} + \frac{\left[\begin{array}{c} \text{Energi total} \\ \text{input} \end{array} \right]}{\text{waktu}} \quad (2.3)$$

2.4 Fault Tolerance Control

Peningkatan performa dan keamanan sangat dibutuhkan dalam suatu system control. Pada industry proses, manufaktur, dan lainnya terkadang terjadi beberapa kerusakan pada actuator, sensor ataupun komponen-komponen yang menyusun sistem tersebut. Untuk mengatasi kerusakan tersebut dilakukan desain control yang mampu menoleransi kerusakan yang terjadi dengan tetap menjaga stabilitas sistem yang diinginkan. *Fault Tolerance Control* adalah sebuah kontrol sistem yang mampu mentoleransi kesalahan dalam sistem untuk meningkatkan kehandalan dan kinerja yang diperlukan. Kontrol sistem ini sering disebut dengan *fault tolerance control system* [4].

FTCS dapat diklasifikasikan pada 2 tipe yaitu *passive fault tolerance control system* (PFTCS) dan *active fault tolerance control system* (AFTCS). PFTCS didesain untuk menjadi sistem kontrol yang *robust* dari kesalahan suatu komponen. Sedangkan AFTCS bereaksi terhadap kesalahan yang terjadi pada suatu komponen dengan merekonfigurasi aksi kontrol sehingga kestabilan dan kinerja pada sistem dapat dijaga. AFTCS dapat juga disebut *fault detection, identification (diagnostic)*. Sehingga tujuan utama dari FTCS adalah merancang kontroler dengan struktur yang cocok untuk mencapai kestabilan dan kinerja. Tidak hanya ketika kontrol komponen berfungsi secara normal tetapi ketika terjadi kegagalan pada suatu komponen yang lain [8].



Gambar 2. 4 Skema Sistem FTC [9]

Berdasarkan **Gambar 2.4** AFTCS dapat juga disebut fault detection and identification (FDI). Perbedaan AFTC dan PFTC adalah terletak pada perancangan FDI dan *reconfigurable controller* (RC). Sehingga kunci utama pada AFTC adalah merancang kontroller yang dapat direkonfigurasi, skema FDI dengan sensitivitas yang tinggi terhadap kesalahan walaupun terdapat ketidakpastian dan *time delay* pada FDI [4].

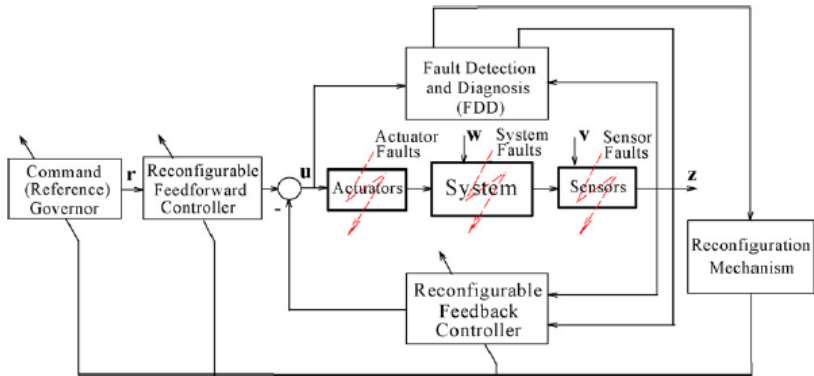
Menurut Zhang dan Jiang (2008), AFTC terdiri atas empat sub sistem, yaitu :

- a. *Reconfigurable controller*, RC;
- b. *FDI scheme*;
- c. Mekanisme RC; dan
- d. *Command reference governor*

FDD dan RC pada keseluruhan struktur sistem adalah perbedaan utama dari *active fault tolerant control* dibandingkan dengan *passive fault tolerant control*. Tahapan dalam perancangan *active fault tolerant control* adalah sebagai berikut :

- a. merancang kontroller yang dapat direkonfigurasi,
- b. dilakukan perancangan *observer* untuk mengestimasi kesalahan aktuator dan/atau sensor
- c. merancang skema FDD dengan sensitivitas yang tinggi terhadap kegagalan dan *robust* terhadap ketidakpastian model, kondisi operasi yang variatif serta gangguan eksternal, FDD digunakan untuk mengetahui besarnya kesalahan yang terjadi pada sistem tersebut
- d. merancang mekanisme rekonfigurasi yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan meskipun terdapat ketidakpastian dan *delay time* pada *fault detection*.

Struktur umum dari *active fault tolerant control system* dapat dilihat pada **Gambar 2.5** sebagai berikut.



Gambar 2. 5 Struktur Umum *Active Fault Tolerant Control* [9]

Berdasarkan **Gambar 2.5** diketahui bahwa rekonfigurasi kontrol harus dirancang secara otomatis untuk menjaga stabilitas dan performansi yang diinginkan. Selain itu, untuk memastikan bahwa sistem tersebut close loop, maka rekonfigurasi kontrol harus dirancang secara feedforward. Untuk menghindari atau mempertimbangkan akan terjadinya penurunan performansi setelah terjadinya kesalahan, ditambahkan dengan command governor untuk menyesuaikan aksi kontrol secara online. Pada intinya, perancangan sistem yang paling penting dalam AFTC terdiri atas 2 sub sistem yaitu fault detection and identification (FDI) dan mekanisme reconfiguration controller. FDI berfungsi sebagai pendeteksi jenis kesalahan dan besarnya kesalahan tersebut. Sedangkan rekonfigurasi sinyal control merupakan mekanisme perubahan aksi control untuk menghilangkan kesalahan yang terjadi [4].

2.5 Observer State

Observer adalah suatu algoritma yang digunakan untuk mengestimasi keadaan (*state*) sistem berdasarkan model matematis sistem, Selain itu observer juga digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sistem observer merepresentasikan model matematis sistem dalam persamaan ruang keadaan sistem yaitu pada persamaan (2.4) dan (2.5) (Ogata, 2006)

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.4)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.5)$$

Dengan :

A = matriks pada keadaan yang merepresentasikan fungsi alih *plant*

B = matriks nilai masukan

C = matriks hasil pengukuran

D = matriks nilai keluaran

x = vektor keadaan (state)

u = vector nilai keluaran/nilai masukan

Model matematis *observer* sama seperti model matematis pada sistem sehingga *observer* dapat mengestimasi keadaan sistem dalam bentuk persamaan ruang keadaan. Untuk mengkompensasi kesalahan aktuator dan kesalahan sensor pada waktu yang sama diperlukan modifikasi algoritma *observer* baru, algoritma tersebut dibentuk oleh (Indriawati dkk, 2015). Efek dari kesalahan aktuator dan sensor diekspresikan sebagai penambahan masukan vektor yang tidak diketahui bentuk vektor tersebut didefinisikan pada persamaan (2.8) dan (2.9), dimana matriks tersebut bertindak pada sistem dinamik dan pengukuran seperti yang direpresentasikan pada persamaan (2.6) dan persamaan (2.7) (Indriawati dkk, 2015).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (2.6)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (2.7)$$

F_a = matriks kesalahan aktuator

F_s = matriks kesalahan sensor

f_a = vektor kesalahan aktuator

f_s = vector kesalahan sensor

Tipe kesalahan sensor dimodelkan sebagai:

$$s_f(t) = \alpha s(t) + \beta \quad (2.8)$$

$$f(t) = s_f(t) - s(t) \quad (2.9)$$

Dengan $s_f(t)$ adalah sinyal aktual, α dan β adalah konstanta. Penambahan kesalahan $f(t)$ - termasuk $f_a(t)$ dan $f_s(t)$ ditunjukkan pada persamaan (2.11).

Observer dibuat dengan kondisi (Indriawati, 2015):

- a. $R_1 \text{ Rank } (C) \geq r + q$
- b. $R_2 \text{ Rank } (CF_{ai}) \geq r$
- c. $R_3 \text{ Rank } (\tilde{A}_a, \tilde{C}_a)$ adalah *observable*

Untuk q dan r masing-masing adalah akumulasi pangkat matriks A dan C , sedangkan \tilde{A}_a dan \tilde{C}_a adalah pelebaran matriks A dan C dengan algoritma hasil persamaan (2.13) yang merupakan penurunan dari persamaan (2.7) dan (2.8) dari kedua persamaan tersebut dapat didefinisikan persamaan baru sebagai berikut:

$$\dot{z}(t) = Az(y - z) \quad (2.10)$$

$$\dot{z}(t) = Az(Cx(t) + F_s f_s(t) - z) \quad (2.11)$$

Untuk Az merupakan matriks identitas (I) untuk $Az \in I^q$, sedangkan matriks dari kesalahan sensor dan aktuator didefinisikan sebagai $f = \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix}$

Dari persamaan (2.11) dan (2.6) dapat didefinisikan matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan matriks yang sudah di ekspansi, persamaan tersebut ditunjukkan pada persamaan (2.12).

$$\dot{x}_a = A_a x_a + B_a u + E_a f \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ Az * C & -Az \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & Az * F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$Aa = \begin{bmatrix} A & 0 \\ Az * C & -Az \end{bmatrix}, B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, Ca = [0 \quad C], Ea = \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & Az * F_s \end{bmatrix}$$

Untuk memperoleh nilai dari *gain observer* maka dipakia ekspansi matrik melalui persamaan ruang keadaan baru yang ditunjukkan pada persamaan (2.14).

$$\hat{\dot{X}}(t) = A_a \hat{X} + B_a u + E_a \begin{bmatrix} \hat{f}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + L_x (Y - \hat{Y}) \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{f}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} = L_f (Y - \hat{Y}) \quad (2.15)$$

$$\hat{Y} = C_a \hat{X} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\dot{x}}(t) \\ \hat{\dot{f}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Aa & Ea \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Ba \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} L_x \\ L_f \end{bmatrix} [Ca \ 0] (Y - \hat{Y}) \quad (2.17)$$

$$\hat{Y} = [Ca \ 0] \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Sehingga matriks yang sudah diekspansi ditunjukkan seperti berikut ini

$$\tilde{A}_a = \begin{bmatrix} Aa & Ea \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{C}_a = [Ca \ 0]$$

2.6 Penentuan Gain Observer

Perbedaan kondisi *error* merupakan perbedaan antara keadaan awal dan keadaan awal estimasi, didefinisikan pada persamaan (2.15), skema *observer* juga ditunjukkan dengan diagram blok yang ditunjukkan pada gambar ().

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x} + Bu + K_e(Y - C\tilde{x}) \quad (2.19)$$

Dengan :

\tilde{x} =keadaan estimasi

$C\tilde{x}$ =keadaan estimasi keluaran

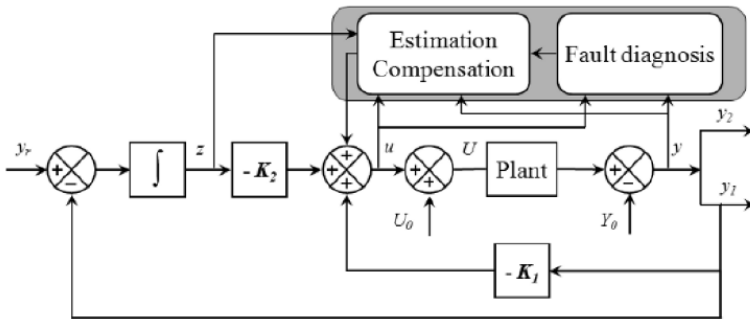
K_e =Gain matriks *Observer*

Formula yang dipakai untuk mendapatkan nilai *gain* dari *observer* (K_e) adalah formula Auckerman (Ogata, 2016). Formula Auckerman dapat diturunkan dengan persamaan (2.20) sampai dengan persamaan (2.23).

$$K_e = K^T = \Phi(A^T)^T \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-2} \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

2.7 Skema Rekonfigurasi Kontrol

Design reconfiguration dari sinyal kontrol akan bekerja secara otomatis agar dapat mengakomodir kesalahan sehingga plant tetap beroperasi. Mekanisme rekonfigurasi dirancang yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan meskipun terdapat ketidakpastian dan *delay time* pada *fault detection* [8].



Gambar 2. 7 Skema Rekonfigurasi Kontrol [8].

Berdasarkan **Gambar 2.7** dijelaskan bahwa design reconfiguration dari sinyal kontrol akan bekerja secara otomatis agar dapat mengakomodir kesalahan sehingga plant tetap beroperasi. Mekanisme rekonfigurasi dirancang yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan meskipun terdapat ketidakpastian dan *delay time* pada *fault detection* [8].

Rekonfigurasi kontrol ini dilakukan dengan menambahkan sinyal kontrol berupa Y . Nilai Y ini didapatkan dari perhitungan sebagai berikut.

$$Y = Y_m - \text{Fault} \quad (2.27)$$

Dimana,

Y = nilai hasil sebenarnya (C)

Y_m = nilai hasil pengukuran (C)

Fault = nilai hasil fault (C)

Dengan adanya penambahan sinyal kontrol tersebut, maka didapatkan nilai error dengan perumusan yang baru sebagai berikut.

$$E = Y_r - Y \quad (2.38)$$

Dimana,

e = error

Y_r = nilai setpoint (C).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan metodologi penelitian yang dilaksanakan pada Tugas Akhir ini. Metodologi yang dilaksanakan dijelaskan melalui tahap-tahap berikut:

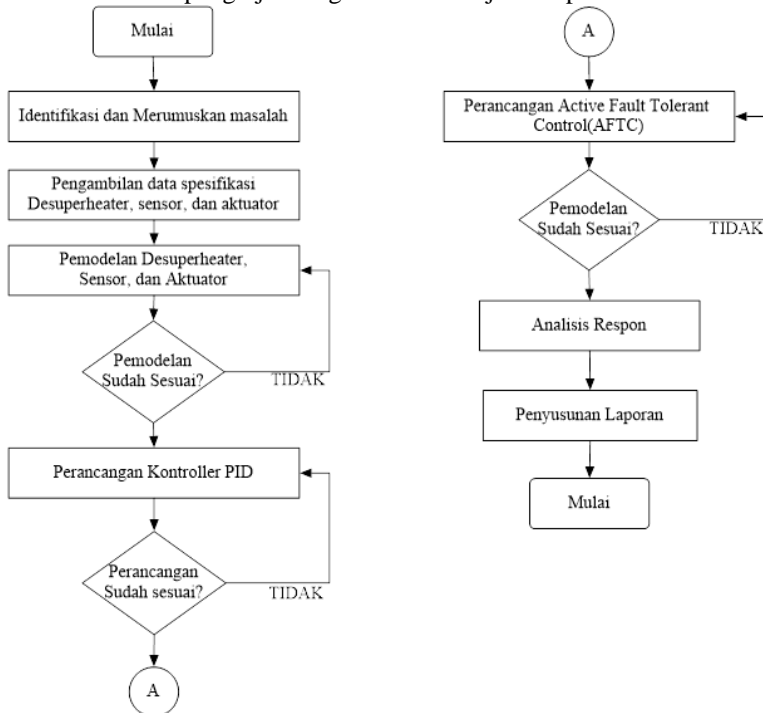
- a. Pengambilan data spesifikasi
Pengambilan data *plant* meliputi pengambilan data spesifikasi *Desuperheater*, Sensor dan Aktuator meliputi data besaran *input* dan *output* pada *Desuperheater*, sensor dan aktuator. Pengambilan data dilakukan di Pabrik III Plant PA B PT Petrokimia Gresik Jawa Timur.
- b. Pemodelan *Desuperheater* dan aktuator
Pemodelan *desuperheater* dan aktuator didapatkan dari data spesifikasi yang telah diambil. Pemodelan *desuperheater* menggunakan hukum kesetimbangan energi.
- c. Validasi Model
Validasi model dengan menggunakan data temperatur di *desuperheater* pada saat kondisi normal yaitu 139°C.
- d. Perancangan kontrol PID
Perancangan kontrol PID ini bertujuan untuk menentukan nilai parameter *proportional* dan *integral* yang mampu menghasilkan respon yang baik untuk sistem.
- e. Perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC)
Tahap pertama adalah perancangan observer yaitu dengan mengubah fungsi transfer *laplace* model menjadi *state space* model sehingga didapatkan matriks A,B,C,D yang digunakan untuk mendapatkan gain observer. Tahap kedua adalah rekonfigurasi kontrol, dimana perancangan ini bertujuan untuk mengembalikan stabilitas kontrol yang tidak stabil akibat kesalahan pada sensor temperatur dengan mengubah perhitungan sinyal kontrolnya.
- f. Analisis respon
Analisis respon berdasarkan uji performansi sistem dengan memberikan kesalahan pada sensor temperatur berupa

kesalahan *bias* dan sensitifitas sehingga didapatkan grafik respon sistem antara AFTC dan kontrol PID.

g. Penyusunan laporan Tugas Akhir

Penyusunan laporan tugas akhir ini berupa pembukuan serta dokumentasi dari semua langkah yang telah ditempuh dalam pengerjaan tugas akhir berupa tulisan ilmiah.

Flowchart pengerjaan tugas akhir ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3. 1 *Flowchart* Pengerjaan Tugas Akhir

3.1 Pengambilan Data *Plant*

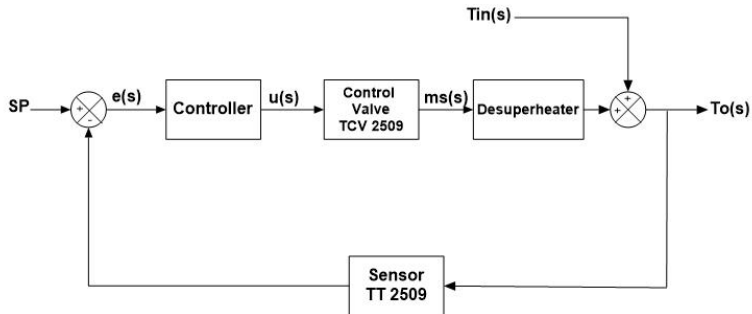
3.1.1 Data Spesifikasi dan Dimensi *Desuperheater*

Pengambilan data plant didasarkan dari data-data yang dibutuhkan untuk pemodelan plant *desuperheater* berupa *volume desuperheater* , *flow steam in*, *flow steam out*, dll. Data *plant*

tersebut didapatkan dari ruang pengendalian proses (*control room*) di PT Petrokimia Gresik Jawa Timur.

Tabel 3. 1 Data Pemodelan *Plant*

Notasi	Keterangan	Nilai dan Satuan
V	<i>Volume Desuperheater</i>	10,96 m ³
\dot{m}_{in}	<i>Mass Flowrate Steam in</i>	6,77 kg/s
\dot{m}_{out}	<i>Mass Flowrate Steam out</i>	7,77 kg/s
ρ_v	<i>Massa Jenis Uap Desuperheater</i>	1,9074 kg/m ³
C_v	<i>Kalor Spesifik Desuperheater</i>	4,29 kJ/kgK
C_{vin}	<i>Kalor Spesifik Steam in</i>	5,2 kJ/kgK
C_{vout}	<i>Kalor Spesifik Steam out</i>	4,28 kJ/kgK
C_p	<i>Kalor Spesifik Water Spray</i>	4,27 kJ/kgK
T_{in}	<i>Temperatur Input Desuperheater</i>	270°C
T_{spray}	<i>Temperatur Water Spray</i>	133,5°C



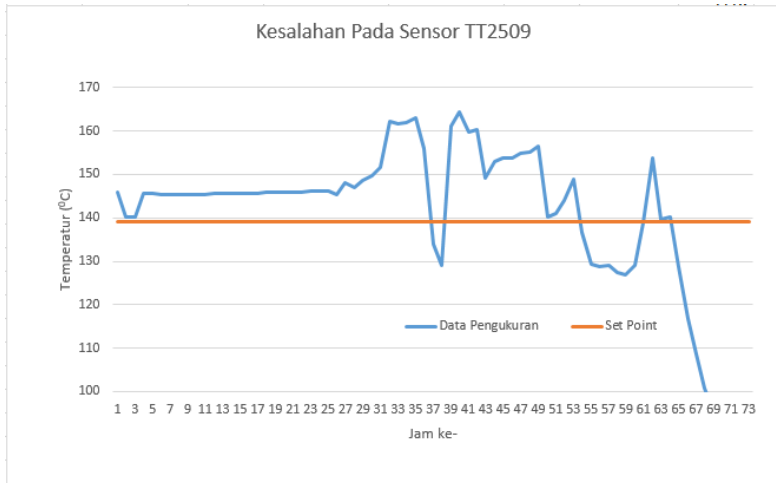
Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem Pengendalian *Feedback* Pada *Desuperheater*

Berdasarkan **Gambar 3.2** dapat dijelaskan bahwa control valve untuk mengatur laju *spray water* merupakan *manipulated variable* yang masuk ke *desuperheater*, dimana temperature pada *desuperheater* merupakan variabel proses untuk menopang keseimbangan sistem. Penambahan variabel *Cp water spray* pada pemodelan *plant* yang merupakan kalor spesifik *spray water* berupa air kondensat yang bertujuan guna membantu proses pendinginan pada *desuperheater* ketika tidak tercapai nilai *set point* yang diberikan

3.1.2 Data Kesalahan Pada Sensor Temperatur

Adapun yang melatarbelakangi perancangan *active fault tolerant control* pada *desuperheater* ini ialah karena adanya kesalahan pembacaan pada sensor temperatur yang menyebabkan performansi sistem menurun. Berikut data dan grafik kesalahan pembacaan pada sensor temperatur TT-2509. Data Pembacaan Sensor TT-2509 dapat dilihat di **Lampiran H**.

Berdasarkan Data Pembacaan Sensor TT-2509 di **Lampiran H** yang diambil dari tanggal 21 Maret 2017 s/d 23 Maret 2017 dengan selang waktu 1 jam sehingga didapat data pembacaan sensor temperatur TT2509. Seperti pada grafik di bawah ini :



Gambar 3. 3 Grafik Kesalahan Sensor TT-2509

Sensor TT-2509 terjadi kesalahan pembacaan suhu steam desuperheater dimana terbaca jauh dari set point yang diinginkan yaitu 139°C dan data pengukuran steady di atas setpoint serta pada jam ke 65 dan seterusnya data pengukuran mengalami penurunan suhu dikarenakan dilakukan *shutdown plant* dan *error* maksimal yang dihasilkan yaitu sebesar 18.34%. Data pengukuran tersebut dapat dikatakan terjadi kesalahan sensor karena pada waktu tersebut bukan control valvenya (aktuator) tetap yaitu sebesar 43% .

3.2 Pemodelan Matematis Aktuator (TCV 2509)

Aktuator yang digunakan untuk mengendalikan temperature desuperheater adalah *flow water spray control valve* TCV-2509 yang merupakan *control valve pneumatic* dengan penggerak diafragma. Dengan laju aliran fluida minimum *spray water* 0,95153 kg/s dan laju aliran maksimum sebesar 1,11111 kg/s. *Input* dari actuators berupa bukan *control valve* 0% - 100%. Model matematik *control valve* diperoleh dengan persamaan :

$$\dot{M}v(s) = \frac{G_{cv}xU(s)}{T_{cv}s+1} \quad (3.1)$$

Dengan

$\dot{M}v(s)$ = Manipulated Variable (kg/s)

$U(s)$ = Sinyal masukan ke control valve (mA)

G_{cv} = Gain total Control Valve

T_{cv} = Time konstant control valve (s) asumsi 1s

Gain Control Valve didapatkan dengan menggunakan persamaan:

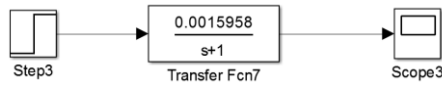
$$G_{cv} = \frac{\text{Laju Aliran maks} - \text{laju Aliran min}}{\text{Bukaan Valve maks} - \text{bukaan valve min}} \quad (3.2)$$

$$G_{cv} = \frac{1,11111 - 0,95153 \text{ kg/s}}{100 - 0 \text{ kg/s}} = 0,0015958 \quad (3.3)$$

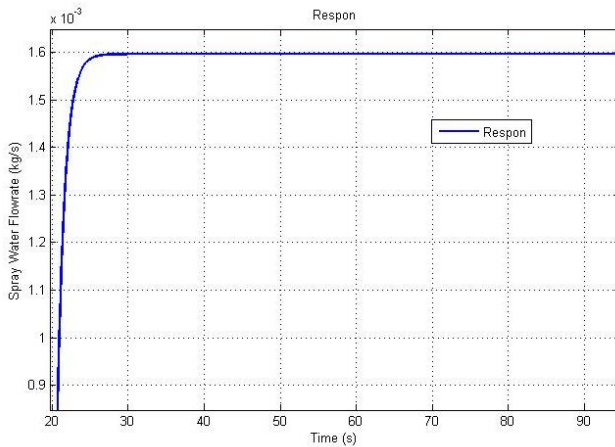
Maka fungsi transfer control valve adalah sebagai berikut :

$$\frac{\dot{m}_s(s)}{u(s)} = \frac{0.0015958}{s+1} \quad (3.4)$$

Dari model diatas dilakukan simulasi dengan *software* matlab untuk skema perancangan seperti berikut :



Gambar 3. 4 Skema Perancangan Simulasi Aktuator



Gambar 3. 5 Respon Simulasi Aktuator

Dari grafik tersebut, dapat diketahui bahwa laju spray water stabil di 1.6×10^{-3} kg/s. Settling time dari respon tersebut yaitu 25s. Aktuator ini digunakan untuk menspray air kondensor untuk menurunkan suhu steam di desuperheater. Besarnya laju spray water tersebut bergantung dari besarnya suhu steam tersebut.

3.3 Pemodelan Matematis *Plant Desuperheater*

Pemodelan matematis *Desuperheater* menggunakan persamaan hukum kesetimbangan energi dimana :

$$[Laju energi terakumulasi] = [E_{in} - E_{out}] + Q$$

$$\frac{dE}{dT} = E_{in} - E_{out} + Q \quad (3.5)$$

$$V \cdot \rho_v \cdot C_v \frac{dT_o}{dt} = \dot{m}_{in} \cdot C_{vin} \cdot T_{in} - \dot{m}_{out} \cdot C_{vout} \cdot T_{out} + \dot{m}_{spray} \cdot C_p \cdot T_{spray} \quad (3.6)$$

Dimana

- V = Volume desuperheater (m^3)
- ρ_v = Densitas steam (kg/m^3)
- \dot{m}_{in} = Mass flowrate steam in (kg/s)
- \dot{m}_{out} = Mass flowrate steam out (kg/s)
- C_v = Kalor spesifik desuperheater (kJ/kgK)
- C_{vin} = Kalor spesifik steam in (kJ/kgK)
- C_{out} = Kalor spesifik steam out (kJ/kgK)
- C_p = Kalor spesifik water spray (kJ/kgK)
- T_{in} = Temperatur inlet (K)
- T_{out} = Temperatur outlet (K)
- T_{spray} = Temperatur water spray (K)

$$10,96.1,9074.4,29. \frac{dT_o}{dt} = 6,77.5,2. T_{in} - 7,77.4,28. T_o + \dot{m}_s. 4,27.406,5 \quad (3.7)$$

$$89,75. \frac{dT_o}{dt} = 35,204. T_{in} - 33,25. T_o + 1735,75. \dot{m}_s \quad (3.8)$$

Dari persamaan diubah menjadi fungsi *laplace* :

$$89,75. s. T_o(s) = 35,204. T_{in}(s) - 33,25. T_o(s) + 1735,75. \dot{m}_s(s) \quad (3.9)$$

$$89,75.s.T_o(s) + 33,25.T_o(s) = 35,204.T_{in}(s) + 1735,75.\dot{m}_s(s) \quad (3.10)$$

$$2,7.s.T_o(s) + 1.T_o(s) = 1,058.T_{in}(s) + 52,19.\dot{m}_s(s) \quad (3.11)$$

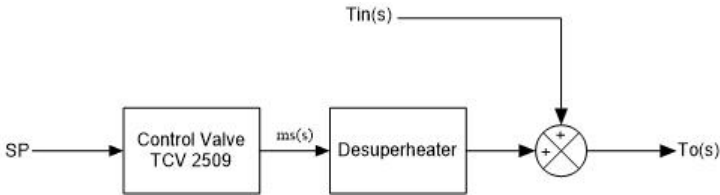
$$[2,7.s + 1]T_o(s) = 1,058.T_{in}(s) + 52,19.\dot{m}_s(s) \quad (3.10)$$

Maka :

$$T_o(s) = \left[\frac{1,058}{2,7s+1} \right] T_{in}(s) + \left[\frac{52,19}{2,7s+1} \right] \dot{m}_s(s) \quad (3.12)$$

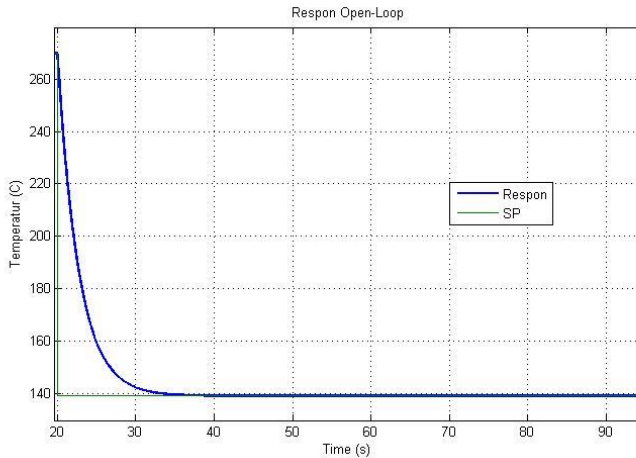
3.4 Validasi Pemodelan

Validasi pemodelan dilakukan bertujuan untuk menguji model *plant* yang telah dibuat pada simulink matlab telah merepresentasikan model *plant* yang sebenarnya di Pabrik III Petrokimia Gresik Unit PA B dengan set point temperatur yang diinginkan yaitu 139°C. Validasi pemodelan dilakukan dengan menggunakan data proses dari *desuperheater* 30-E-2506 di PT Petrokimia Gresik Jawa Timur. Skema perancangan model *open loop plant* dan aktuator ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3. 6 Skema Perancangan Model *Open Loop Plant* dan Aktuator

Setelah melakukan pemodelan matematis *plant*, *plant* disimulasikan dalam *software matlab* dengan melinierisasi model *plant* untuk mendapatkan fungsi transfer. Grafik respon *open loop* akan ditunjukkan pada **Gambar 3.7** sebagai berikut.

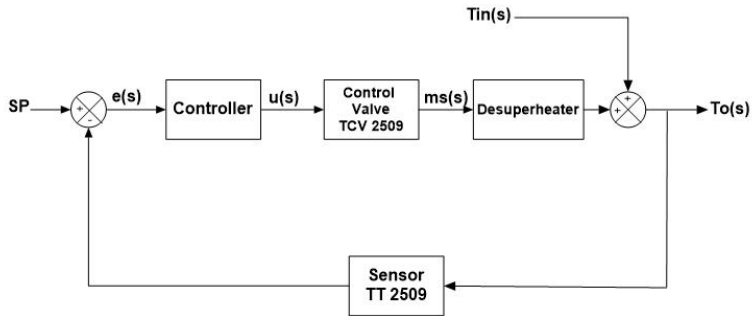


Gambar 3. 7 Grafik Validasi Model dengan *Open Loop*

Berdasarkan **Gambar 3.7** dapat diketahui bahwa uji respon sistem ketika *open loop* dapat mencapai *setpoint* sebesar 139°C ketika keadaan *steady* sehingga model dapat dikatakan valid. Suhu *steam input* dari *boiler* bernilai konstan sebesar 270°C kemudian di turunkan di *desuperheater* menjadi 139°C dengan menspraykan air *kondensor* ke *steam* tersebut sehingga mencapai nilai yang diinginkan. Skema perancangan *open loop* dengan *software* Matlab dapat dilihat di **Lampiran I**.

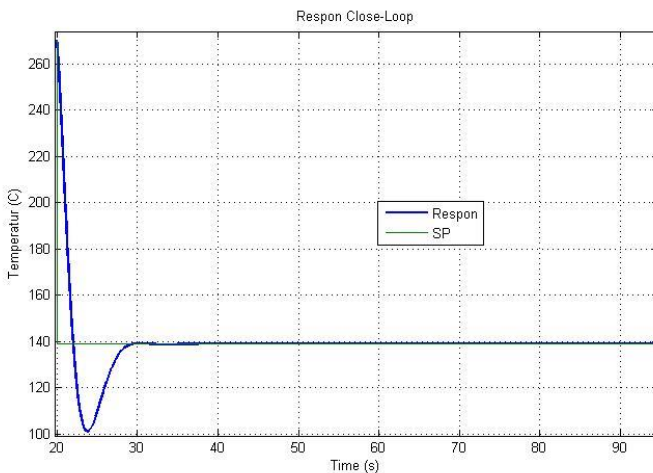
3.5 Perancangan Pengendali *Proportional Integral Derivative (PID)*

Pengendalian temperatur pada *desuperheater* 30-E-2506 menggunakan pengendalian *feedback*. Pada pengendalian jenis *feedback* digunakan *transmitter* yang mengukur nilai proses yang dikendalikan sebagai pembanding dengan *setpoint*. Untuk menentukan *gain* pengendali PID menggunakan nilai K_p , T_i , dan T_d yang didapatkan dari tuning PID dengan metode *trial & error*. Pada sistem ini didapatkan nilai $K_p = 20.89$, $T_i = 8.16$, dan $T_d = 0.82$. Setelah itu sistem disimulasikan dengan bantuan *software* Matlab dengan skema seperti **Gambar 3.8**.



Gambar 3. 8 Skema Diagram Blok Perancangan Pengendali PID

Berdasarkan **Gambar 3.8** *setpoint* yang digunakan adalah besaran temperatur dalam derajat Celcius, sinyal kontrol yang keluar dari PID *controller water spray flowrate*, keluaran dari *Plant Desuperheater* berupa temperatur dalam derajat Celcius, dan keluaran dari sensor juga berupa temperatur dalam derajat Celcius. Berikut ini respon dari close-loop yang dilakukan di Simulink.



Gambar 3. 9 Grafik Respon Perancangan Kontroller PID

Dari gambar dapat diketahui parameter respon sistem ketika mencapai waktu *steady (settling time)* sebesar 9.73 detik dan *maximum undershoot* sebesar 27.3% serta *error steady state* sistem sebesar 0.28%. Skema perancangan *close loop* dengan *software* Matlab dapat dilihat di **Lampiran J**.

3.6 Perancangan Active Fault Tolerant Control

3.6.1 Perancangan Observer

Perancangan *Observer* dengan variabel terukur temperatur dan laju *spray* dengan cara menerjemahkan Gambar 3.8 menjadi ruang keadaan, persamaan hasil representasi perhitungan dari **Gambar 3.8** dijelaskan pada persamaan (3.13) dan (3.14)

$$T_o(s) = \left[\frac{1,058}{2,7s+1} \right] T_{in}(s) + \left[\frac{52,19}{2,7s+1} \right] \dot{m}_s(s) \quad (3.13)$$

$$\frac{\dot{m}_s(s)}{u(s)} = \frac{0.0015958}{s+1} \quad (3.14)$$

Persamaan (3.51) dan (3.52) di *invers laplace* sehingga hasilnya dapat berubah ke domain waktu seperti yang tertera pada persamaan (3.53) dan (3.54) agar bisa didapatkan nilai dari persamaan ruang keadaan.

$$\frac{dT_o(t)}{dt} = \left[\frac{1,058}{2,7} \right] T_{in}(t) + \left[\frac{52,19}{2,7} \right] \dot{m}_s(t) - \left[\frac{1}{2,7} \right] T_o(t) \quad (3.15)$$

$$\frac{d\dot{m}_s(t)}{dt} = 0,0015958u(t) - \dot{m}_s(t) \quad (3.16)$$

Kedua persamaan tersebut dibuat kedalam bentuk matriks ruang keadaan seperti berikut ini.

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_o(t)}{dt} \\ \frac{d\dot{m}_s(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2,7} & \frac{52,19}{2,7} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_o(t) \\ \dot{m}_s(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1,058}{2,7} & 0 \\ 0 & 0,0015958 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{in}(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} T_o(t) \\ \dot{m}_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2,7} & \frac{52,19}{2,7} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,3704 & 19,3296 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1,058}{2,7} & 0 \\ 0 & 0,0015958 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3889 & 0 \\ 0 & 0,0016 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = 0$$

$$Fs = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Seperti yang dijelaskan pada persamaan (2.28) sampai dengan persamaan (2.30) maka bentuk dari matriks ruang keadaan dapat diekspansi menjadi

$$Aa = \begin{bmatrix} -0.3704 & 19.3296 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$Ba = \begin{bmatrix} 0.3889 & 0 \\ 0 & 0.0016 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Ca = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Ea = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Agar dapat mendefinisikan sensor maka matriks ruang keadaan di ekspansi lagi menjadi

$$\tilde{A}_a = \begin{bmatrix} -0.3704 & 19.3296 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{C}_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Menyelesaikan *Observer* maka diperlukan pemilihan dari nilai *pole placement*, nilai *pole placement* yang dipakai adalah :

$$\begin{aligned} p1 &= -1.9068 + 6.6688i \\ p2 &= -1.9068 - 6.6688i \\ p3 &= -0.6767 + 1.4059i \\ p4 &= -0.6767 - 1.4059i \\ p5 &= -0.0738 + 0.0000i \\ p6 &= -0.5502 + 0.0000i \end{aligned}$$

Dari nilai *pole placement* diatas secara otomatis dengan menggunakan *software Matlab R2013b* dengan *syntax* “*place*” yang merupakan ringkasan dari persamaan (2.17)-(2.24) dan didapatkan nilai *gain observer* bernilai sebagai berikut.

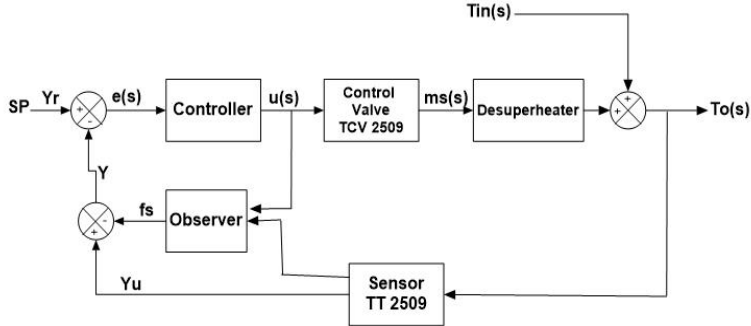
$$K_e = \begin{bmatrix} 38.2803 & 0.4207 & 2.6363 & 0.0967 & 2.4388 & 10.1059 \\ 4.1226 & 1.4072 & 1.0783 & -0.2157 & 0.7604 & -2.1140 \end{bmatrix}$$

Untuk skema perancangan observer dapat dilihat di **Lampiran K** dan untuk *syntax* perancangan observer di **Lampiran G**.

3.6.2 Rekonfigurasi Sinyal Kontrol untuk Sensor

Rekonfigurasi sinyal pengendali merupakan tahap akhir perancangan AFTC yang bertujuan untuk mengembalikan kestabilan sistem pada saat terjadi kesalahan sensor. Perancangan

skema AFTC menggunakan *gain observer* yang telah didapatkan pada sub-bab 3.6.1. Skema rekonfigurasi kontrol ditunjukkan pada **Gambar 3.10**. Untuk skema perancangan rekonfigurasi kontrol di Simulink secara keseluruhan dapat dilihat di **Lampiran L**.



Gambar 3. 10 Skema Rekonfigurasi Sinyal Kontrol dari *Observer Sensor*

Rekonfigurasi kontrol ini dilakukan dengan menambahkan sinyal kontrol berupa Y . Nilai Y ini didapatkan dari perhitungan sebagai berikut.

$$Y = Y_u - f_s \quad (3.19)$$

dimana,

Y = nilai sebenarnya

Y_u = nilai hasil pengukuran

f_s = nilai *fault*

Dengan adanya penambahan sinyal kontrol tersebut, maka didapatkan nilai *error* dengan perumusan yang baru sebagai berikut.

$$e = Y_r - Y \quad (3.20)$$

dimana,

e = nilai *error*

Y_r = nilai *setpoint*

3.7 Uji Performansi

Uji performansi dilakukan untuk menguji algoritma AFTC yang telah dibuat dapat berjalan dengan baik atau tidak. Uji ini dilakukan dengan memberikan suatu kesalahan pada sensor. Kesalahan yang diberikan berupa kesalahan *bias* dan sensitivitas. Kesalahan bias disimulasikan sebesar +5%, -5%, +10%, dan -10%. Kesalahan sensitivitas disimulasikan sebesar 96%, 92%, 88%, dan 84%.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

ANALISA DATA

4.1 Hasil Perancangan Simulasi AFTC

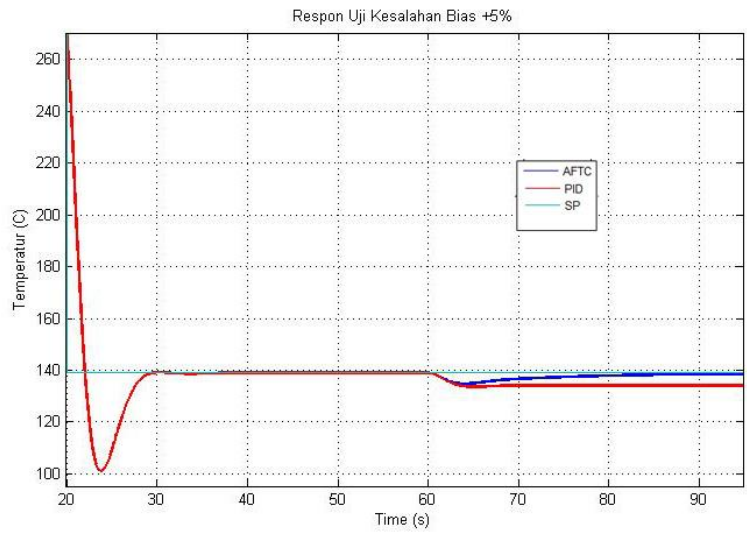
Berdasarkan skema perancangan observer dan rekonfigurasi kontrol pada Lampiran K dan L maka keseluruhan perancangan AFTC serta PID pada simulink pada Lampiran M.

4.2 Uji Kesalahan Bias

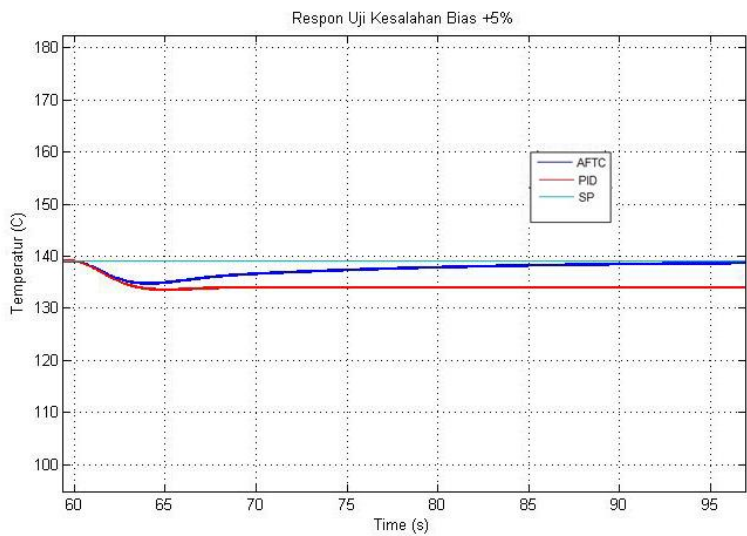
Untuk menguji performansi dari sistem kontrol temperature maka diberikan kesalahan pada sensor temperatur berupa kesalahan bias. Bias merupakan penyimpangan nilai dari nilai tetapan yang telah ditentukan. Bias dalam pengukuran juga bias disebut dengan nilai *Error Sistematis*. *Error Sistematis* mendeskripsikan *error* pada pembacaan *output* sistem pengukuran yang secara konsisten (*error steady state*) pada satu sisi pembacaan yang benar, yaitu seluruh *error* adalah positif atau seluruh *error* adalah negative. Semakin kecil nilai biasnya maka nilai *error steady state*nya juga semakin kecil begitupun sebaliknya [14]. Nilai bias yang diberikan pada uji ini adalah $\pm 5\%$ dan $\pm 10\%$ dari span pengukuran temperature transmitter. Kesalahan Bias diberikan pada detik ke 60. Hasil respon sistem dengan kesalahan bias dapat dilihat pada sub-bab **4.2.1-4.2.4**.

4.2.1 Uji Kesalahan Bias +5%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan bias ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-60. Di grafik tersebut akan dibandingkan antara sistem pengendali AFTC (*Active Fault Tolerant Control*) dengan sistem pengendali PID. Bedanya di pengendali PID tidak terdapat observer dan rekonfigurasi kontrol untuk mentolerir kesalahan dari sensor tersebut sedangkan di sistem pengendali AFTC terdapat dua komponen tersebut.



Gambar 4. 1 Grafik Respon Kesalahan Bias +5%



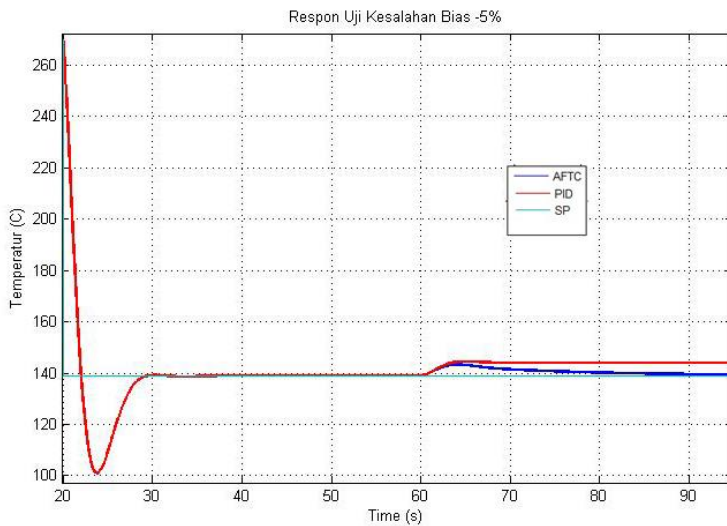
Gambar 4. 2 Grafik Perbesaran Kesalahan Bias +5%

Tabel 4. 1 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias +5% saat dikenai Kesalahan pada Detik ke-60

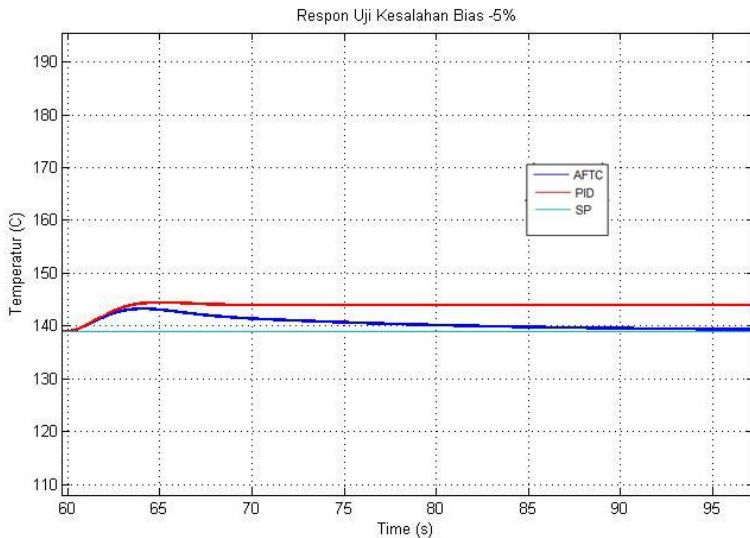
No	Parameter	AFTC	PID
1	<i>Maximum Overshoot</i>	0%	0%
2	<i>Maximum Undershoot</i>	3.00%	3.88%
3	<i>Error Steady State</i>	0%	3.59%
4	<i>Settling Time</i>	34.86 s	-

4.2.2 Uji Kesalahan Bias -5%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan bias ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-60.



Gambar 4. 3 Grafik Respon Kesalahan Bias -5%



Gambar 4. 4 Grafik Perbesaran Kesalahan Bias -5%

Tabel 4. 2 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias -5% saat dikenai Kesalahan pada Detik ke-60

No	Parameter	AFTC	PID
1	<i>Maximum Overshoot</i>	3.02%	3.95%
2	<i>Maximum Undershoot</i>	0%	0%
3	<i>Error Steady State</i>	0%	3.59%
4	<i>Settling Time</i>	47.8 s	-

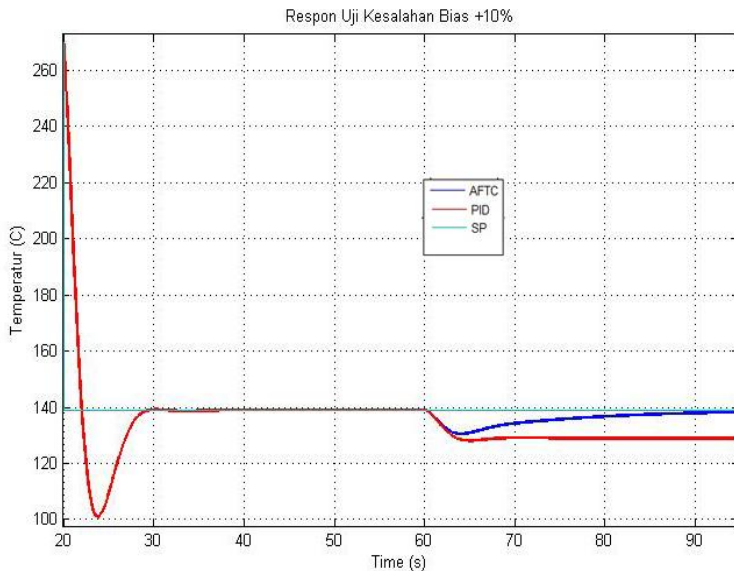
Pada **Gambar 4.2** dan **Gambar 4.4** serta penjabaran nilai parameter yang tampak pada **Tabel 4.1** dan **Tabel 4.2**, terlihat bahwa respon sistem pengendalian AFTC mengatasi kesalahan bias sebesar $\pm 5\%$ lebih baik daripada sistem pengendalian PID.

Dari segi parameter, baik *maximum overshoot*, *maximum undershoot*, *error steady state*, maupun *settling time*, sistem pengendalian AFTC memiliki nilai lebih kecil daripada sistem

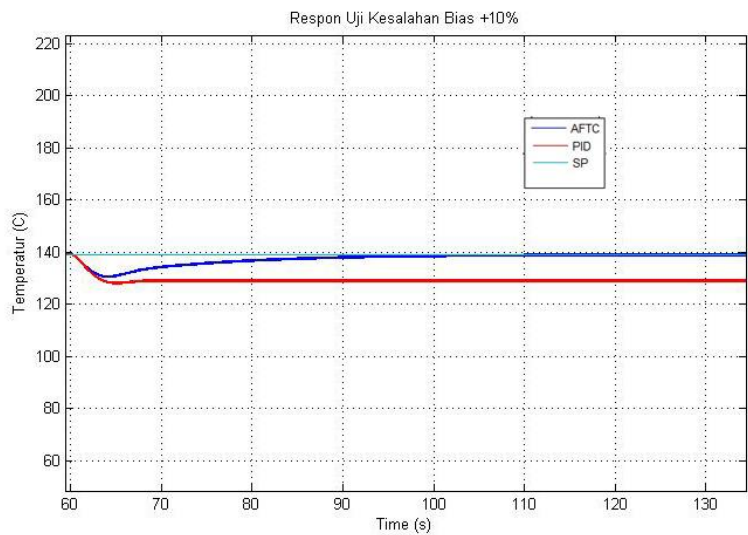
pengendalian PID. Semakin kecil nilai parameter tersebut, maka semakin baik performansinya. Hal ini disebabkan oleh adanya rekonfigurasi pengendali atau aksi pengendali yang bekerja untuk mengatasi kesalahan tersebut. Maka dari itu, sistem pengendalian AFTC memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem pengendalian PID.

4.2.3 Uji Kesalahan Bias +10%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan bias ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-60.



Gambar 4. 5 Grafik Respon Kesalahan Bias +10%



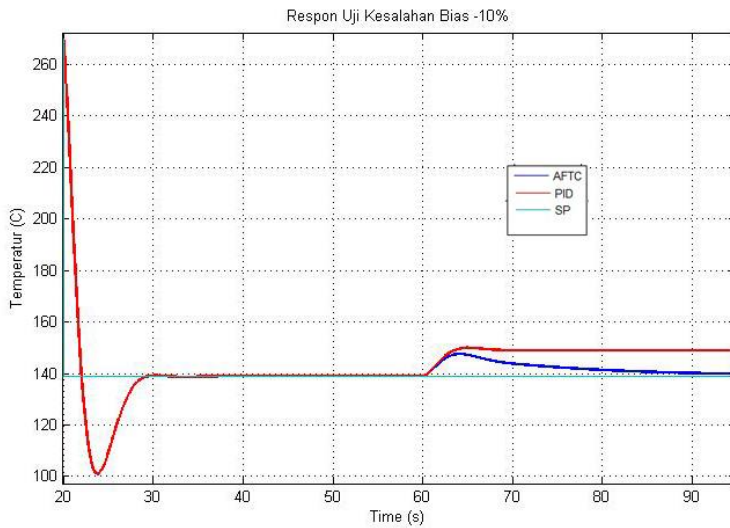
Gambar 4. 6 Grafik Perbesaran Kesalahan Bias +10%

Tabel 4. 3 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias +10% saat dikenai Kesalahan pada Detik ke-60

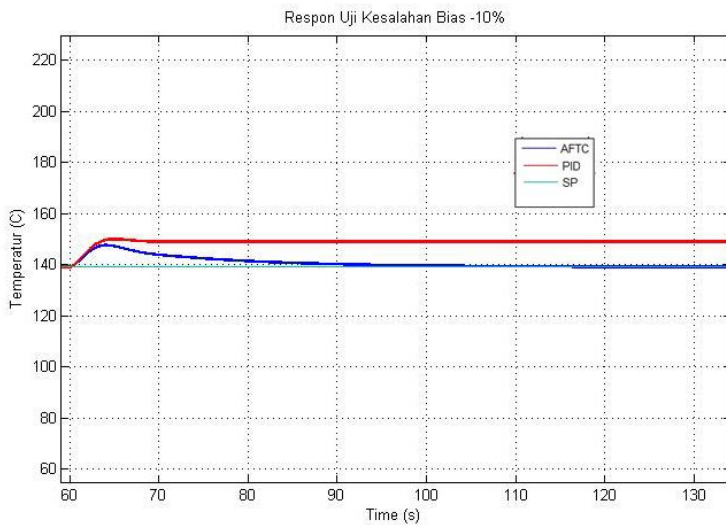
No	Parameter	AFTC	PID
1	Maximum Overshoot	0%	0%
2	Maximum Undershoot	6.11%	7.84%
3	Error Steady State	0%	7.19%
4	Settling Time	43.4 s	-

4.2.4Uji Kesalahan Bias -10%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan bias ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-60.



Gambar 4. 7 Grafik Respon Kesalahan Bias -10%



Gambar 4. 8 Grafik Perbesaran Kesalahan Bias -10%

Tabel 4. 4 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias -10% saat dikenai Kesalahan pada Detik ke-60

No	Parameter	AFTC	PID
1	<i>Maximum Overshoot</i>	6.11%	7.84%
2	<i>Maximum Undershoot</i>	0%	0%
3	<i>Error Steady State</i>	0%	7.19%
4	<i>Settling Time</i>	50.5 s	-

Pada **Gambar 4.6** dan **Gambar 4.8** serta penjabaran nilai parameter yang tampak pada **Tabel 4.3** dan **Tabel 4.4**, terlihat bahwa respon sistem pengendalian AFTC mengatasi kesalahan bias sebesar $\pm 10\%$ lebih baik daripada sistem pengendalian PID.

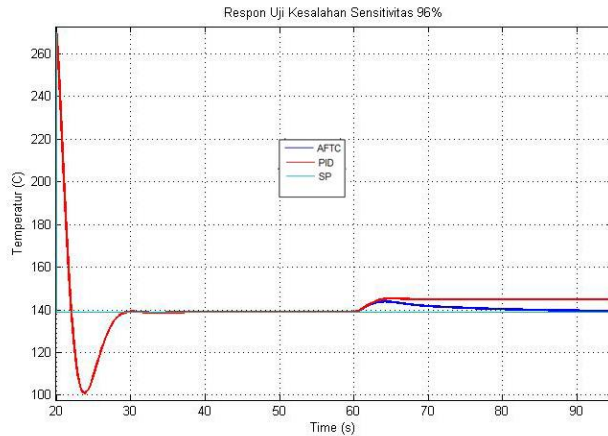
Dari segi parameter, baik *maximum overshoot*, *maximum undershoot*, *error steady state*, maupun *settling time*, sistem pengendalian AFTC memiliki nilai lebih kecil daripada sistem pengendalian PID. Semakin kecil nilai parameter tersebut, maka semakin baik performansinya. Hal ini disebabkan oleh adanya rekonfigurasi pengendali atau aksi pengendali yang bekerja untuk mengatasi kesalahan tersebut. Maka dari itu, sistem pengendalian AFTC memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem pengendalian PID.

4.3 Uji Kesalahan Sensitifitas

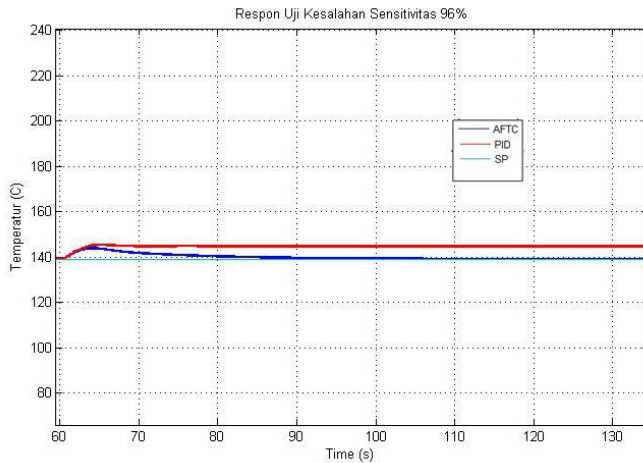
Sensitivitas berkaitan dengan seberapa peka sebuah sensor menanggapi input berupa variabel fisis untuk dikeluarkan dalam rupa nilai yang dapat diolah. Semakin besar nilai sensitivitas sensor, maka semakin baik kinerja sensor tersebut. Kesalahan sensitivitas adalah kesalahan nilai keluaran sensor karena kurang sensitifnya sensor sehingga sensor tidak memberikan sinyal keluaran sebesar yang seharusnya dikeluarkan. Untuk uji kesalahan sensitivitas ini diberikan kesalahan sebesar 96%, 92%, 88%, dan 84% dari *output* sensor temperatur.

4.3.1 Uji Kesalahan Sensitifitas 96%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan akan ditinjau pada dua kondisi yaitu kondisi *start-up* (sebelum diberi kesalahan), dan kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-60.



Gambar 4. 9 Respon Sistem dengan Kesalahan Sensitifitas 96%



Gambar 4. 10 Grafik Perbesaran Respon Sistem dengan Kesalahan Sensitifitas 96% pada detik ke-60

Tabel 4. 5 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitifitas 96% pada Kondisi diberi Kesalahan

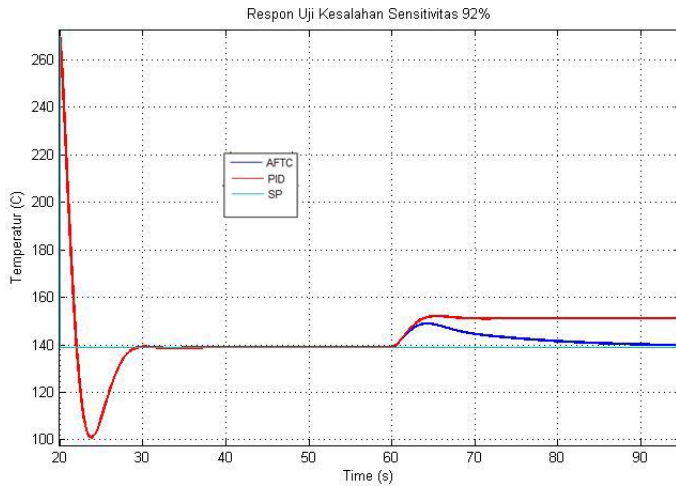
No	Parameter	AFTC	PID
1	<i>Maximum Overshoot</i>	3.45%	4.53%
2	<i>Maximum Undershoot</i>	0%	0%
3	<i>Error Steady State</i>	0%	4.17%
4	<i>Settling Time</i>	38.13 s	-

Pada **Gambar 4.9** dan **Gambar 4.10** serta **Tabel 4.5** menunjukkan respon sistem ketika diberi kesalahan sensitifitas 96% dimana kesalahan sensitifitas 96% berarti sensor kehilangan 4% dari sinyal *output*nya.

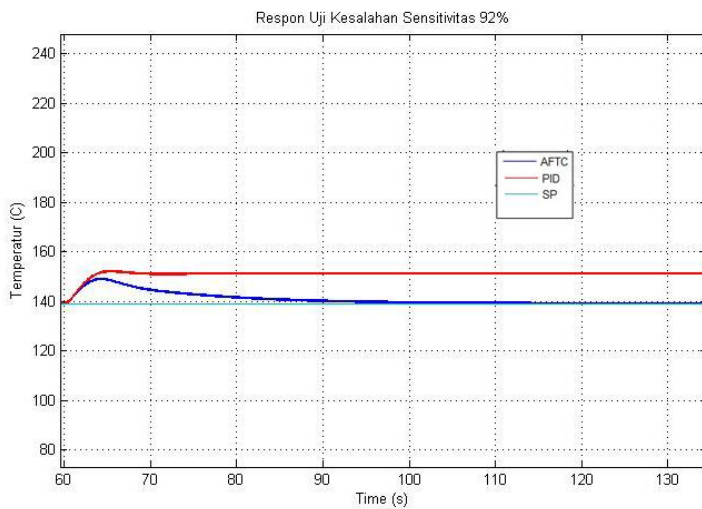
Maximum overshoot yang terjadi pada pengendali AFTC lebih kecil dari pengendali PID saat dikenai kesalahan yakni sebesar 3.45% lebih kecil dari PID sebesar 4.53%. Dan waktu untuk mencapai keadaan *steady* (*settling time*) dari AFTC yakni sebesar 38,13 detik dengan *steady* pada temperatur 139 °C saat terjadi kesalahan dibandingkan dengan PID yang tidak dapat mencapai setpoint sehingga tidak ada *settling time* dan tidak bisa menolerir kesalahan sehingga *steady* pada temperatur 144.8 °C. Pengendali PID memiliki *error steady state* sebesar 4.17% jauh lebih besar dengan AFTC yang memiliki *error steady state* sebesar 0% dari set point. Hal ini membuktikan bahwa pengendali AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

4.3.2 Uji Kesalahan Sensitifitas 92%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan akan ditinjau pada dua kondisi yaitu kondisi *start-up* (sebelum diberi kesalahan), dan kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-60.



Gambar 4. 11 Respon Sistem dengan kesalahan sensitifitas 92%



Gambar 4. 12 Grafik Perbesaran Respon Sistem dengan Kesalahan Sensitifitas 92% pada detik ke-60

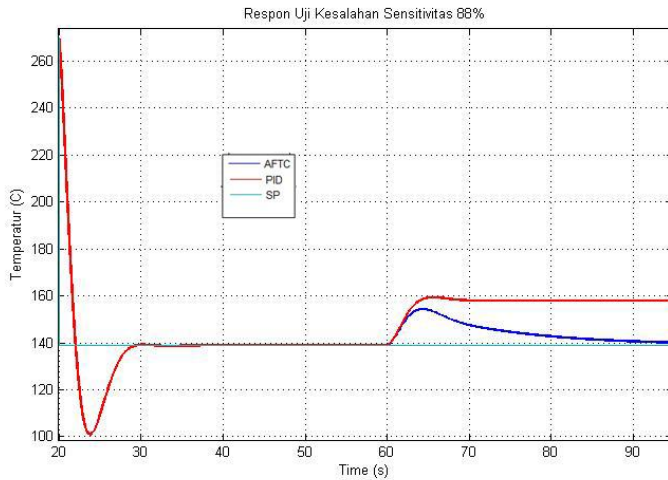
Tabel 4. 6 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitifitas 92% pada Kondisi diberi Kesalahan

No	Parameter	AFTC	PID
1	<i>Maximum Overshoot</i>	7.19%	9.35%
2	<i>Maximum Undershoot</i>	0%	0%
3	<i>Error Steady State</i>	0%	8.70%
4	<i>Settling Time</i>	45.4 s	-

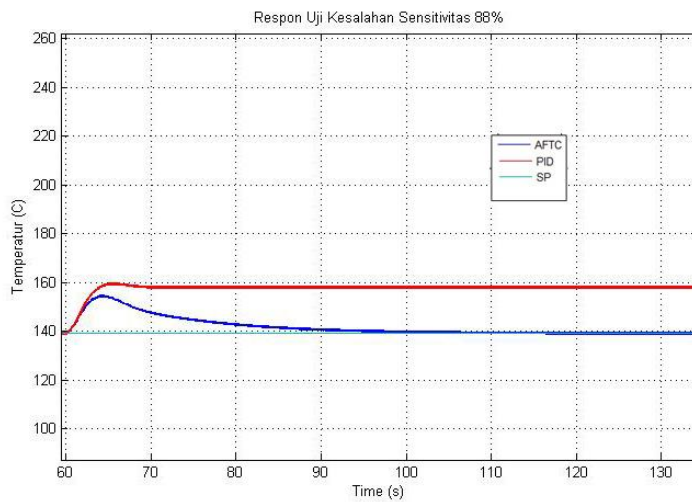
Pada Gambar 4.11 dan 4.12 serta Tabel 4.6 menunjukkan respon sistem ketika diberi kesalahan sensitifitas 92% dimana kesalahan sensitifitas 92% berarti sensor kehilangan 8% dari sinyal *outputnya*. *Maximum overshoot* yang terjadi pada pengendali AFTC lebih kecil dari pengendali PID saat dikenai kesalahan yakni sebesar 7.19% lebih kecil dari PID sebesar 9.35%. Dan waktu untuk mencapai keadaan *steady* (*settling time*) dari AFTC yakni sebesar 45.4 detik dengan *steady* pada temperatur 139 °C saat terjadi kesalahan dibandingkan dengan PID yang tidak dapat mencapai setpoint sehingga tidak ada *settling time* dan tidak bisa menolerir kesalahan sehingga *steady* pada temperatur 151.1 °C. Pengendali PID memiliki *error steady state* sebesar 8.70% jauh lebih besar dengan AFTC yang memiliki *error steady state* sebesar 0% dari set point. Hal ini membuktikan bahwa pengendali AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

4.3.3 Uji Kesalahan Sensitifitas 88%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan akan ditinjau pada dua kondisi yaitu kondisi *start-up* (sebelum diberi kesalahan), dan kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-60.



Gambar 4. 13 Respon Sistem dengan kesalahan sensitifitas 88%



Gambar 4. 14 Grafik Perbesaran Respon Sistem dengan Kesalahan Sensitifitas 88% pada detik ke-60

Tabel 4. 7 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitifitas 88% pada Kondisi diberi Kesalahan

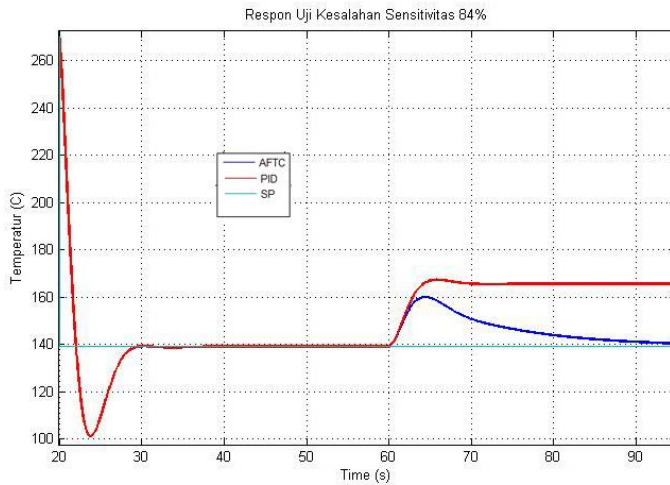
No	Parameter	AFTC	PID
1	<i>Maximum Overshoot</i>	11.00%	14.60%
2	<i>Maximum Undershoot</i>	0%	0%
3	<i>Error Steady State</i>	0%	13.66%
4	<i>Settling Time</i>	37.73 s	-

Pada **Gambar 4.13** dan **Gambar 4.14** serta **Tabel 4.7** menunjukkan respon sistem ketika diberi kesalahan sensitifitas 88% dimana kesalahan sensitifitas 88% berarti sensor kehilangan 12% dari sinyal *outputnya*.

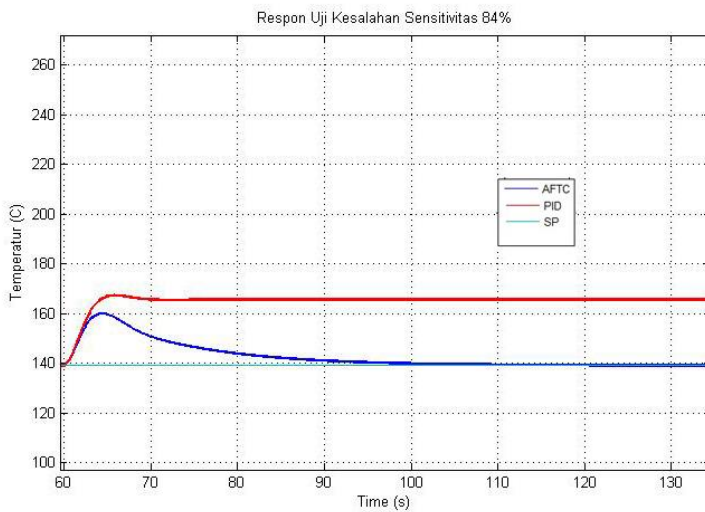
Maximum overshoot yang terjadi pada pengendali AFTC lebih kecil dari pengendali PID saat dikenai kesalahan yakni sebesar 11.00% lebih kecil dari PID sebesar 14.60%. Dan waktu untuk mencapai keadaan *steady* (*settling time*) dari AFTC yakni sebesar 37.73 detik dengan *steady* pada temperatur 139 °C saat terjadi kesalahan dibandingkan dengan PID yang tidak dapat mencapai setpoint sehingga tidak ada *settling time* dan tidak bisa menolerir kesalahan sehingga *steady* pada temperatur 158 °C. Pengendali PID memiliki *error steady state* sebesar 13.66% jauh lebih besar dengan AFTC yang memiliki *error steady state* sebesar 0% dari set point. Hal ini membuktikan bahwa pengendali AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

4.3.4 Uji Kesalahan Sensitifitas 84%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan akan ditinjau pada dua kondisi yaitu kondisi *start-up* (sebelum diberi kesalahan), dan kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-60.



Gambar 4. 15 Respon Sistem dengan kesalahan sensitifitas 84%



Gambar 4. 16 Grafik Perbesaran Respon Sistem dengan Kesalahan Sensitivitas 88% pada detik ke-60

Tabel 4. 8 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitifitas 84% pada Kondisi diberi Kesalahan

No	Parameter	AFTC	PID
1	<i>Maximum Overshoot</i>	15.10%	20.28%
2	<i>Maximum Undershoot</i>	0%	0%
3	<i>Error Steady State</i>	0%	19.06%
4	<i>Settling Time</i>	40.3 s	-

Pada **Gambar 4.15** dan **Gambar 4.16** serta **Tabel 4.8** menunjukkan respon sistem ketika diberi kesalahan sensitifitas 84% dimana kesalahan sensitifitas 84% berarti sensor kehilangan 16% dari sinyal *outputnya*.

Maximum overshoot yang terjadi pada pengendali AFTC lebih kecil dari pengendali PID saat dikenai kesalahan yakni sebesar 15.10% lebih kecil dari PID sebesar 20.28%. Dan waktu untuk mencapai keadaan *steady* (*settling time*) dari AFTC yakni sebesar 40.3 detik dengan *steady* pada temperatur 139 °C saat terjadi kesalahan dibandingkan dengan PID yang tidak dapat mencapai setpoint sehingga tidak ada *settling time* dan tidak bisa menolerir kesalahan sehingga *steady* pada temperatur 165.5 °C. Pengendali PID memiliki *error steady state* sebesar 19.06% jauh lebih besar dengan AFTC yang memiliki *error steady state* sebesar 0% dari set point. Hal ini membuktikan bahwa pengendali AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor TT-2509.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

- Perancangan Sistem AFTC berhasil karena lebih mampu mengakomodasi kesalahan sensor yaitu kesalahan sensitivitas dan bias, dibanding dengan sistem pengendali PID.
- Respon Sistem AFTC lebih dapat mengakomodasi kesalahan dibandingkan dengan sistem pengendali PID dibuktikan dengan:
 1. Uji kesalahan sensitivitas sistem pengendali AFTC menghasilkan maksimum *overshoot* maksimal sebesar 15.10% dan *error steady state* sebesar 0 %, sedangkan sistem pengendali PID menghasilkan maksimum *overshoot* maksimal sebesar 20.28% dan *error steady state* sebesar 19.06%.
 2. Sistem pengendali AFTC dapat mengakomodasi kesalahan bias dengan maksimum *overshoot* terbesar 6.11% dan *error steady state* sebesar 0 %, Sedangkan sistem pengendali PID menghasilkan maksimum *overshoot* terbesar 7.84% dan *error steady state* sebesar 7.19 %.

5.2 Saran

Dalam proses tugas akhir ini terhadap beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya, yakni pengaplikasian algoritma AFTC pada komponen industri lainnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

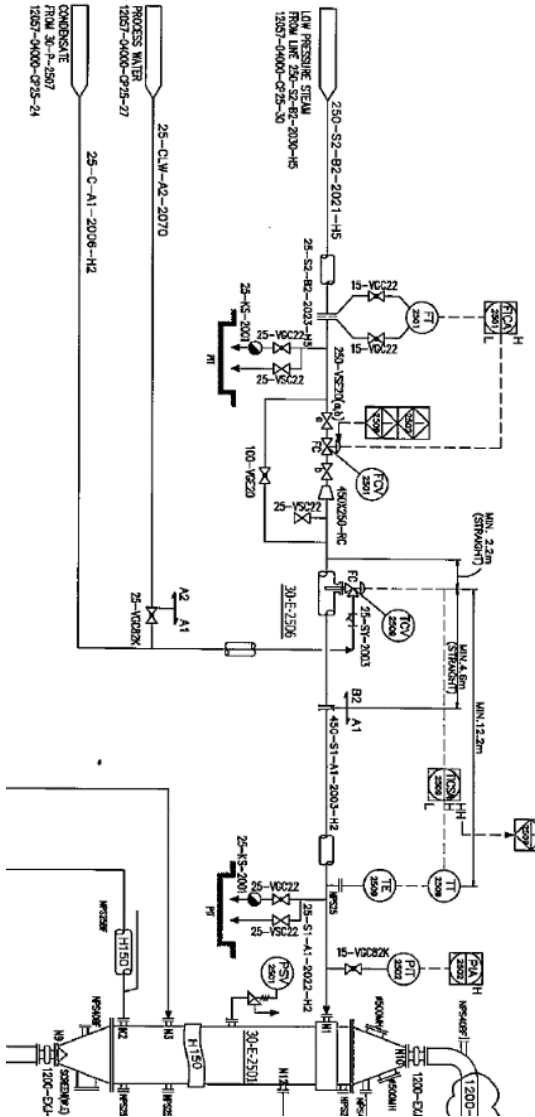
DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT Petrokimia Gresik “Company Profile Perusahaan”.
- [2] Angga Setyawan, “Perancangan Sistem Pengendalian Temperature Pada Superheater Dengan Metode Fuzzy Logic Di Pltu Unit Ii PT.PJB Unit Pembangkitan Gresik” 2010.
- [3] Azwar A, “Perancangan *Active Fault Tolerant Control* Pada Sistem Pengendalian Temperatur *Fuel Gas Superheat Burner* PT Petrokimia Gresik Jawa Timur Dengan Kesalahan Pada Sensor Temperatur” 2016.
- [4] Youmin Zhang, Jin Jiang, “Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control system,” *Annual Reviews in Control*, vol. 32, issue 2, pp. 229-252, December 2008.
- [5] F. Gunterus, Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses, Elex Media Komputindo Jakarta, 1997 Hari Septian, 2014.
- [6] Paul M, “Computational Analysis of Water Atomization in Spray Desuperheater of Steam Boilers” 2013.
- [7] Hamidah, L. N. “Analisa Kinerja Waste Heat Boiler Dengan Metode Keseimbangan Kalor Dan Massa Di Pabrik 1 (Satu) PT.Petrokimia Gresik” 2010.
- [8] K. Indriawati, T. Agustinah, A. Jazidie,”Reconfigurable fault-tolerant control of linier system with actuator and sensor faults,” *IEEE Conference on Control System, Computing and Engineering*, 29 November–1 December 2013.
- [9] H. Noura, D. Theilliol, J.C. Ponsart, A. Chamseddine, *Fault-tolerance Control Systems: Design and Practical Applications*, Springer Verlag London, 2009.
- [10] K. Ogata, *Modern Control Engineering* – 5 th ed.,Prentice Hall, 2006. Nugrahani, Ade. 2012.
- [11] Geiselhart, R. “*Converse Lyapunov Theorems for Discrete-Time Systems: an Alternative Approach* International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems”, 2014.
- [12] Werner, H. “*Controller Design Using Linear Matrix Inequalities*, Institute Of Control Engineering”, 2006.
- [13] Boyd, Stephen; Ghaoui, Laurent El; Feron, Eric; Balakrishnan, Venkataramanan;, *Linear Matrix Inequalities in*

System and Control Theory, Philadelphia: SIAM studies in applied mathematics, 1994.

[14] Musyafa, A. “Sistem Pengukuran dan Kalibrasi: Kesalahan Pengukuran, Teknik Fisika ITS”, 2012.

LAMPIRAN A **P&ID Desuperheater 30-E-2506**



LAMPIRAN B

DATA SHEET TCV-2509

WUHUAN ENGINEERING CO.,LTD.		REVAMP OF PHOSPHORIC ACID PLANT PROJECT				PT. PETROKIMIA GRESIK	
		PA UNIT					
		Data Sheet for T&P Reducing Device					
		WEC JOB NO. 12057		Detail engineering design		2A REV	
		Doc No. 12057-04000-CP22-30-E-2506		Sheet 2 of 2			
01	Instrument name	Pneumatic Control valve				Data sheet No.	
02	Tag No.	TCV-2509				Model No.	
03	Quantity	1				Body type	
04	P&ID No.	12057-04000-CP25-19				Size	
05	Pipe No.	25-C-A1-2006-H2				End connection type	
06	Pipe size & material	1" A53 Gr.B.S				Size, facing & rating	
07						SA-182-F22 (3)	
08	Fluid name	CONDENSATE/PROCESS WATER				Bonnet	
09	Fluid state	<input type="checkbox"/> Gas <input checked="" type="checkbox"/> Liquid <input type="checkbox"/> Steam				SA-182-F22 (3)	
10	Units	kg/h				Packing	
11	Gas					Grafloil	
12	Liquid	3425 3600 4000				Fluid tend to	
13	Steam					<input type="checkbox"/> Open <input type="checkbox"/> Close	
14	Density	kg/m³ 935				Bonnet style	
15	Spec. gravity					<input type="checkbox"/> STD <input checked="" type="checkbox"/> Heat Fin	
16	Gas molecular	18				<input type="checkbox"/> Below <input type="checkbox"/> Extend	
17	Viscosity	mPa.s 0.271				No. of seat	
18	Compress. Factor	kg/cm² 133.5				<input type="checkbox"/> Single <input type="checkbox"/> Double	
19	Upstream temp.	°C				Plug type	
20	Shutoff ΔP	MPa 1.3				<input checked="" type="checkbox"/> Globe <input type="checkbox"/> Ball	
21	Upstr. press.	MPa(g) 0.4 0.65 1				<input type="checkbox"/> Cage <input type="checkbox"/>	
22	Down. press.	MPa(g) 0.1 0.25 0.6				Port size	
23	Pressure drop	kPa 300 400 400				mm	
24		Min. Nor. Max.				Seat/plug sealing type	
25	Vapor pressure	MPa(g)				<input type="checkbox"/> Soft <input checked="" type="checkbox"/> Metal	
26	Critical pressure	MPa(g) kg/cm² (g)				Flow characteristic	
27	Critical temp.	°C				<input type="checkbox"/> EQP <input checked="" type="checkbox"/> Lin. <input type="checkbox"/> On/off	
28	Upstr. gas weight percent					Leakage class	
29	Liquid flow	kg/h				CLASS IV	
30	Liquid density	kg/m³				Plug Guide	
31	Gas flow	m³/h				<input type="checkbox"/> Top <input type="checkbox"/> T-B <input type="checkbox"/> Cage	
32	Gas density	kg/m³				Seat	
33	Gas	Cv Note 2				400/47 SST	
34	Liquid	Cv Note 2				Plug	
35	Steam	Cv Note 2				400/47 SST	
36	Total	Cv Note 2				Stem	
37	Rated	Cv Note 2				400/47 SST	
38	Open	% Note 2				Guide	
39	Sound level	dB(A) ≤85				400/47 SST	
40	Service	For Quench water				Model No.	
41	Model No.					Air fails valve position	
42	Remarks					<input type="checkbox"/> Open <input checked="" type="checkbox"/> Close <input type="checkbox"/> Lock	
43						Travel	
44						mm	
45						Open/close time	
46						s	
						Action	
						<input type="checkbox"/> Direct <input type="checkbox"/> Reverse	
						Spring range	
						Air supply press.	
						0.5-0.7 MpaG 3.5-4 kgf/cm²	
						Air tubing connections	
						<input checked="" type="checkbox"/> 1/4" NPT <input type="checkbox"/>	
						Tag No.	
						Model No.	
						Input/output signal	
						<input checked="" type="checkbox"/> 4-20mA + Hart <input checked="" type="checkbox"/> 3-15Psi	
						Electrical class	
						Action	
						<input checked="" type="checkbox"/> Direct <input type="checkbox"/> Reverse	
						Elec. Connections	
						<input checked="" type="checkbox"/> 1/2" NPT <input type="checkbox"/>	
						Air tubing connections	
						<input checked="" type="checkbox"/> 1/4" NPT <input type="checkbox"/>	
						Jacket	
						<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/>	
						Air filter-regulator	
						<input checked="" type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> 1/4" NPT	
						Limit switch	
						<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/>	
						Solenoid valve	
						<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/>	
						Handwheel	
						<input checked="" type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> Top fixed	
						Position transmitter	
						<input checked="" type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/>	
						Nozzle material	
						Hastelloy C-22 (Note 3)	

Notes:

1. The protection classification of instrument is IP65.
2. The valve manufacturers shall be responsible for the value of control valve's CV, valve material and its opening, supply the data sheet of calculation.
3. Material of nozzle shall be recommended by vendor finally according to vendor's experience. According to vendor's recommendation, normally the Hastelloy C-22 was too soft and its hardness was not enough to be applied as nozzle material.
4. Delivery c/w calibration & material certificate.

LAMPIRAN C

DATA SHEET DESUPERHEATER

WUHUAN ENGINEERING CO., LTD.		REVAMP OF PHOSPHORIC ACID PLANT PROJECT						PT. PETROKIMI A GRESIK	
		PA UNIT							
		Data Sheet for T&P Reducing Device							
		WEC JOB NO. 12057		Detail engineering design		2A REV			
		Doc No. 12057-04000-CP22-30-E-2506				Sheet 1 of 2			
SERVICE		Desuperheater				ITEM 30-E-2506			
1 TYPE / SIZE						MR			
2 QUANTITY 1		OPERATING / STAND-BY		1/0		DESIGN CODE			
operating data				Manufacture Boundary					
4		inlet steam	water spray	Service	Number	Type	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no		
5	Max press. MPa(g)	0.5	1	Depressure valve	1		<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no		
6	Normal press. MPa(g)	0.25	0.65	Desuperheater valve	1		<input checked="" type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no		
7	Min press. MPa(g)	0.2	0.4	Actuator	1		<input checked="" type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no		
8	Max temp. °C	290	140	Nozzle	1		<input checked="" type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no		
9	Normal temp. °C	270	133.5	Throttle (if any)	*1		<input checked="" type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no		
10	Min temp. °C	260	130	Safety valve			<input type="checkbox"/> yes <input checked="" type="checkbox"/> no		
11	Max flow t/h	27	4*1	Check valve (if any)	*1		<input checked="" type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no		
12	Normal flow t/h	24.4	3.6	Steam pipe			<input type="checkbox"/> yes <input checked="" type="checkbox"/> no		
13	Min flow t/h			Transition pipe (if any)	*1		<input checked="" type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no		
14	Outlet steam press. MPa(g)	0.25		Quench water pipe			<input type="checkbox"/> yes <input checked="" type="checkbox"/> no		
15	Outlet steam temp. °C	139.0		Accessory		yes			
16	Inlet design press. MPa(g)	0.6		Site control cabinet	*1		<input type="checkbox"/> yes <input checked="" type="checkbox"/> no		
17	Inlet design temp. °C	300							
18	Outlet design press. MPa(g)	0.6							
19	Outlet design steam temp. °C	300							
20	Spray design press. MPa(g)	1.5							
21	Spray design temp. °C	150.0							
22	Test press. MPa(g)	1.5* design press							
Technical Specification				CODES AND STANDARDS					
24	<input type="checkbox"/> press. reducing and temp. reducing in one device <input type="checkbox"/> press. reducing and temp. reducing separately			ASME VIII					
25				ASME B36.10M					
26	Depressure valve	NA		ASME B31.1					
27	Desuperheater valve	Detail see instrument datasheet TCV-2509		IEC/ISA					
28	Safety valve	<input type="checkbox"/> spring <input type="checkbox"/> impulse <input checked="" type="checkbox"/> not provided							
29	Stand-by of control valve	<input type="checkbox"/> yes <input checked="" type="checkbox"/> no							
30	Installation	<input type="checkbox"/> outdoor <input checked="" type="checkbox"/> indoor							
31	Specification	<input type="checkbox"/> cold district <input checked="" type="checkbox"/> tropic district <input type="checkbox"/> high elevation							
32		<input type="checkbox"/> valve body liquid leak detection							
33		<input type="checkbox"/> valve body radial detection							
Steam pipe and water pipe material				Pipe Diameter Table					
Steam Inlet		A53 Gr.B.S		Symbol	Note	DN	type	Connecting type	Flange code
Steam Outlet		A53 Gr.B.S			Steam Inlet	DN450(ø47.2+0.5)	Flange	SO-RF	ASME B16.5
Spray Water		A53 Gr.B.S			Steam Outlet	DN450(ø47.2+0.5)	Flange	SO-RF	ASME B16.5
					Spray Water	DN225(ø33.4+1.5)	Flange	SO-RF	ASME B16.5

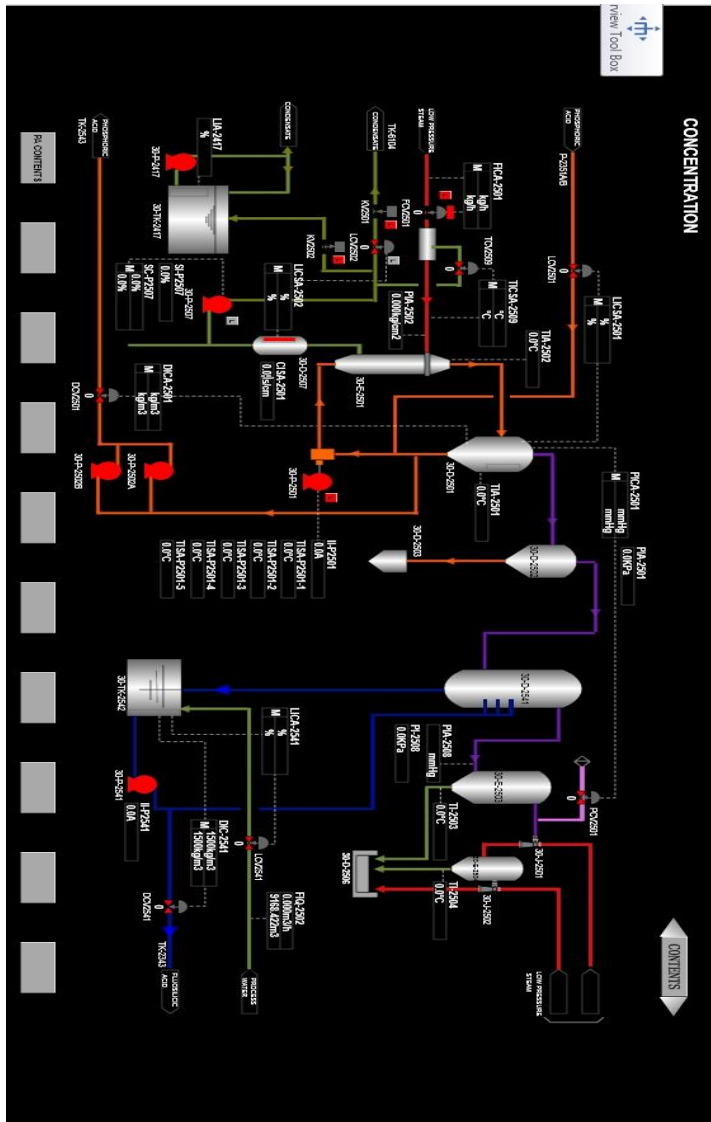
notes: 1.*1 is filled by MFR.

TEST AND CALIBRATION SHEET
INSTRUMENT III

FM-34-3001

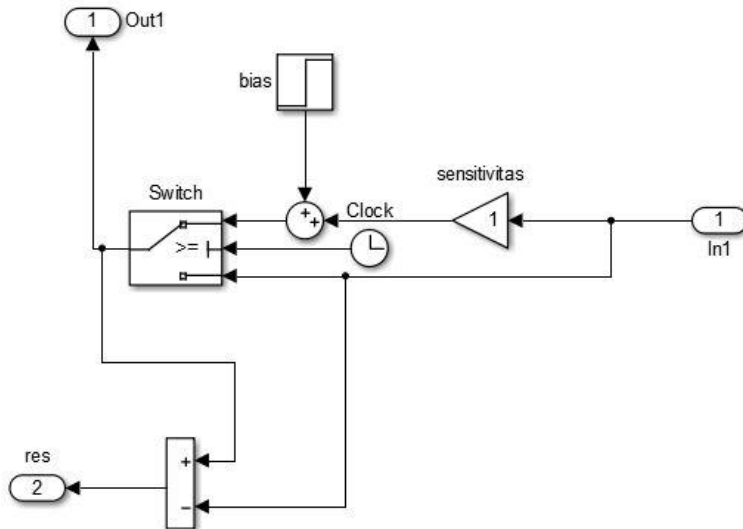
LAMPIRAN E

HMI Plant PA B



LAMPIRAN F

Skema Simulink Fault Sensor



Gambar ini merupakan perancangan fault sensor di Simulink matlab 2013b. Uji kesalahan pada sensor, disimulasikan dengan pemberian nilai bias dan sensitivitas untuk menguji dari active fault tolerant control.

LAMPIRAN G

Source Code M-File Matlab untuk pendefinisian matriks observer dan optimasi LMI

```
A=[-1/2.7 52.19/2.7;0 -1]; %Matriks A
B=[1.05/2.7 0;0 0.0015958];%Matriks B
C=[1 0;0 1];%Matriks C
n = length(A);
p = size(C,1);
m = size(B,2);
Fa=[0;1];
Fs=[1;0];
fs = size(Fs,2);
fa = size(Fa,2);
Abar = 1*eye(p);
Aa = [A zeros(n,p); Abar*C -Abar];
Ba = [B;zeros(p,m)];
Ea = [Fa zeros(n,fs); zeros(p,fa) Abar*Fs];
Ca = [zeros(p,n) eye(p)];
Atild = [Aa Ea; zeros(fa+fs,n+p) zeros(fa+fs)];
Ctild = [Ca zeros(p,fa+fs)];
rank(Atild);
rank(observ(Atild,Ctild));
Bo = [zeros(n+p,fa+fs); eye(fa+fs)];
Qf = eye(n+p+fa+fs);
Qe = eye(fa+fs);

setlmis([])
P = lmivar(1,[n+p+fa+fs 1]);
G = lmivar(2,[n+p+fa+fs p]);
gamma = lmivar(1,[1 0]);

lmiterm([1 1 1 P],1,Atild,'s')
lmiterm([1 1 1 G],-1,Ctild,'s')
lmiterm([1 1 1 0],Qf)
lmiterm([1 1 2 P],1,Bo)
lmiterm([1 2 2 gamma],-1,1)
```

```
lmiterm([-2 1 1 P],1,1)
```

```
LMIs = getlmis;
```

```
[t,xdec]=feasp(LMIs);  
P = dec2mat(LMIs,xdec,1);  
G = dec2mat(LMIs,xdec,2);  
gamma = dec2mat(LMIs,xdec,3);  
Ktild = inv(P)*G;  
K = Ktild(1:n+p, :);  
L = Ktild(n+p+1:n+p+fa+fs, :);  
pole=eig(Atild-Ktild*Ctild);
```

```
%menentukan gain dari nilai pole yg didapatkan
```

```
p1 = -1.9068 + 6.6688i;  
p2 = -1.9068 - 6.6688i;  
p3 = -0.6767 + 1.4059i;  
p4 = -0.6767 - 1.4059i;  
p5 = -0.0738 + 0.0000i;  
p6 = -0.5502 + 0.0000i;
```

```
Gain=place(Atild',Ctild',[p1 p2 p3 p4 p5 p6]);
```


LAMPIRAN H

Data Kesalahan Sensor TT-2509

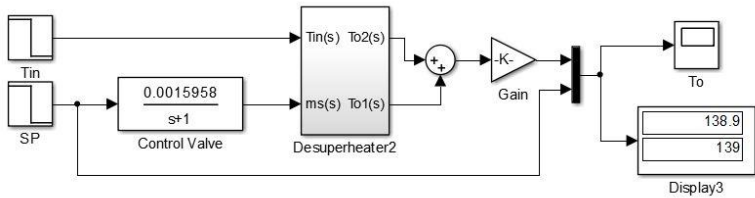
No	Tanggal	Waktu	SP (°C)	PV (°C)	MV
1	21/03/2017	00.02	139	145.8	43%
2	21/03/2017	01.02	139	140.2	43%
3	21/03/2017	02.02	139	140.2	43%
4	21/03/2017	03.02	139	145.5	43%
5	21/03/2017	04.02	139	145.5	43%
6	21/03/2017	05.02	139	145.4	43%
7	21/03/2017	06.02	139	145.4	43%
8	21/03/2017	07.02	139	145.4	43%
9	21/03/2017	08.02	139	145.3	43%
10	21/03/2017	09.02	139	145.4	43%
11	21/03/2017	10.02	139	145.4	43%
12	21/03/2017	11.02	139	145.5	43%
13	21/03/2017	12.02	139	145.5	43%
14	21/03/2017	13.02	139	145.6	43%
15	21/03/2017	14.02	139	145.7	43%
16	21/03/2017	15.02	139	145.7	43%
17	21/03/2017	16.02	139	145.7	43%
18	21/03/2017	17.02	139	145.8	43%
19	21/03/2017	18.02	139	145.9	43%
20	21/03/2017	19.02	139	146	43%
21	21/03/2017	20.02	139	146	43%
22	21/03/2017	21.02	139	146	43%
23	21/03/2017	22.02	139	146.1	43%
24	21/03/2017	23.02	139	146.1	43%
25	22/03/2017	00.02	139	146.2	43%
26	22/03/2017	01.02	139	145.4	43%

27	22/03/2017	02.02	139	148.2	43%
28	22/03/2017	03.02	139	147.1	43%
29	22/03/2017	04.02	139	148.7	43%
30	22/03/2017	05.02	139	149.8	43%
31	22/03/2017	06.02	139	151.5	43%
32	22/03/2017	07.02	139	162.1	43%
33	22/03/2017	08.02	139	161.8	43%
34	22/03/2017	09.02	139	162	43%
35	22/03/2017	10.02	139	163.1	43%
36	22/03/2017	11.02	139	156.1	43%
37	22/03/2017	12.02	139	133.9	43%
38	22/03/2017	13.02	139	129	43%
39	22/03/2017	14.02	139	161.2	43%
40	22/03/2017	15.02	139	164.5	43%
41	22/03/2017	16.02	139	159.9	43%
42	22/03/2017	17.02	139	160.4	43%
43	22/03/2017	18.02	139	149.3	43%
44	22/03/2017	19.02	139	153	43%
45	22/03/2017	20.02	139	153.9	43%
46	22/03/2017	21.02	139	153.9	43%
47	22/03/2017	22.02	139	155	43%
48	22/03/2017	23.02	139	155.1	43%
49	23/03/2017	00.02	139	156.5	43%
50	23/03/2017	01.02	139	140.1	43%
51	23/03/2017	02.02	139	141	43%
52	23/03/2017	03.02	139	144	43%
53	23/03/2017	04.02	139	149	43%
54	23/03/2017	05.02	139	136.6	43%
55	23/03/2017	06.02	139	129.3	43%
56	23/03/2017	07.02	139	128.8	43%

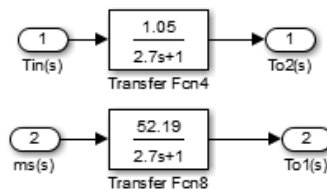
57	23/03/2017	08.02	139	129	43%
58	23/03/2017	09.02	139	127.3	43%
59	23/03/2017	10.02	139	126.9	43%
60	23/03/2017	11.02	139	129	43%
61	23/03/2017	12.02	139	138.8	43%
62	23/03/2017	13.02	139	153.7	43%
63	23/03/2017	14.02	139	139.7	43%
64	23/03/2017	15.02	139	140.3	43%
65	23/03/2017	16.02	139	128.8	43%
66	23/03/2017	17.02	139	116.7	43%
67	23/03/2017	18.02	139	108.7	43%
68	23/03/2017	19.02	139	100.7	43%
69	23/03/2017	20.02	139	95.1	43%
70	23/03/2017	21.02	139	91.2	43%
71	23/03/2017	22.02	139	86.6	43%
72	23/03/2017	23.02	139	79.1	43%
73	24/03/2017	00.02	139	77.3	43%

LAMPIRAN I

Skema Open Loop Simulink & Variabel Desuperheater



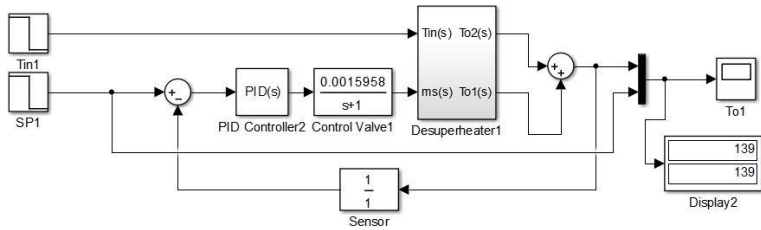
Gambar ini merupakan perancangan open loop desuperheater yang terdiri dari aktuatur control valve (TV-2509) dan plant desuperheater (30E-2506) untuk menentukan bahwa perancangan tersebut telah mempresentasikan plant sebenarnya.



Gambar ini merupakan fungsi transfer dari desuperheater yang terdiri dari dua variable inputan yaitu $T_{in}(s)$ suhu steam input dan $ms(s)$ laju spray water kondensor.

LAMPIRAN J

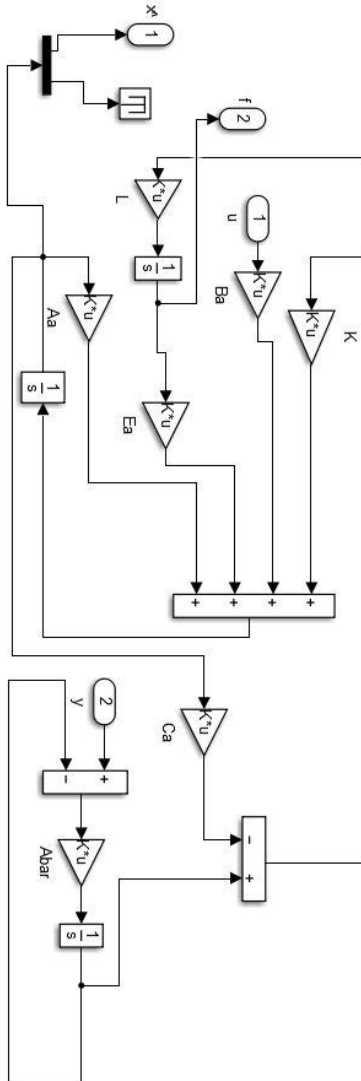
Skema Close Loop Simulink



Gambar ini merupakan perancangan close loop desuperheater. Dilakukan dengan sistem feedback kontrol. Diberikan PID Controller untuk memperbaiki sinyal respon.

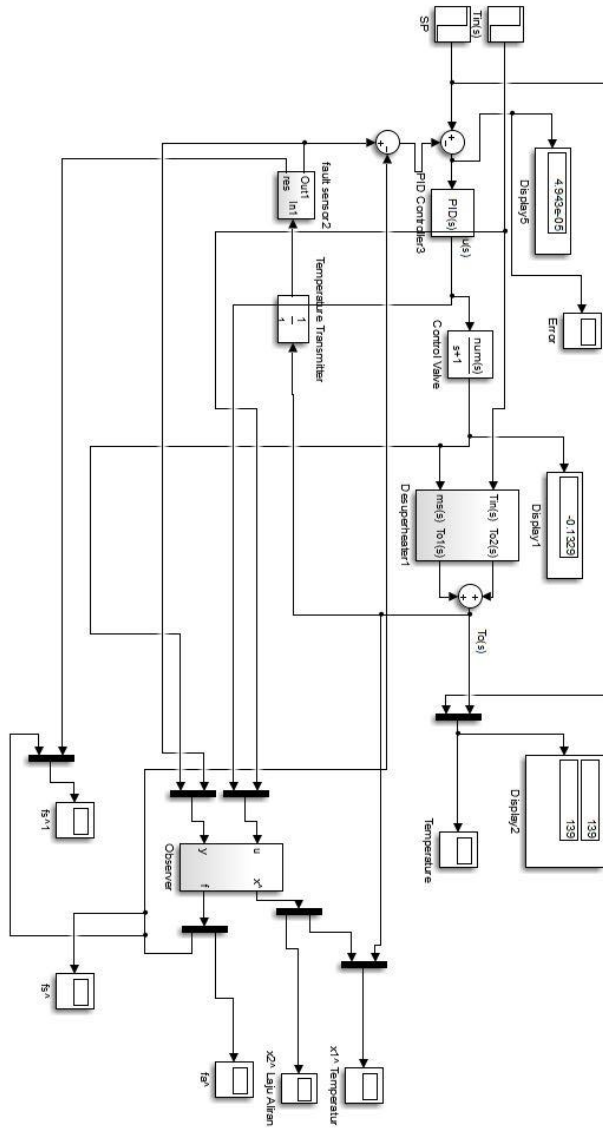
LAMPIRAN K

Skema Perancangan Observer Simulink

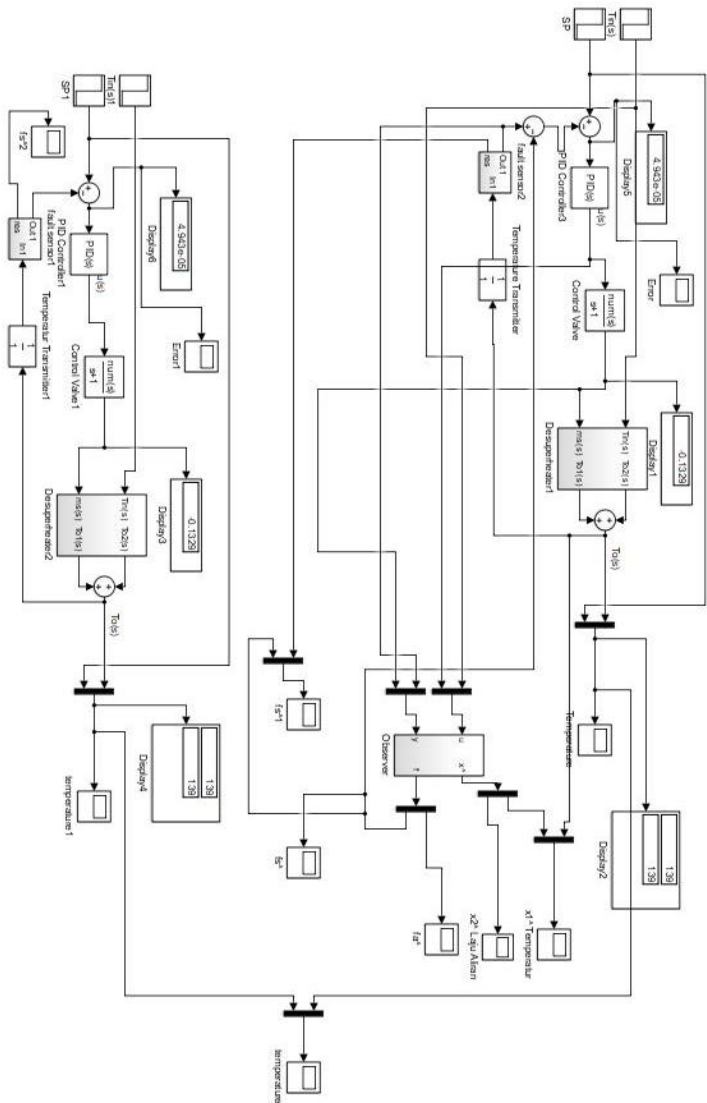


LAMPIRAN L

Skema Perancangan Rekonfigurasi Kontrol Simulink (AFTC)



LAMPIRAN M
Skema Perancangan AFTC & PID



BIODATA PENULIS



Haris Dwi Happy Putra merupakan nama lengkap penulis dengan nama panggilannya, Haris. Penulis dilahirkan di Bondowoso pada tanggal 1 April 1994 sebagai anak kedua dari dua bersaudara dari ayahanda Hapi, S.Pd dan ibunda Suyati, S.Pd. Riwayat pendidikan penulis adalah SD Negeri Nangkaan Bondowoso tahun (2001–2007), SMP Negeri 1 Bondowoso tahun (2007–2010), SMA Negeri 2 Bondowoso tahun (2010–2013). Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Fisika ITS pada tahun 2013. Semasa

perkuliahan, Penulis aktif organisasi kemahasiswaan di FUSI UA Teknik Fisika, penulis fokus pada bidang minat rekayasa instrumentasi dan kontrol untuk menyelesaikan tugas akhirnya. Penulis dapat dihubungi melalui email: harisdwihp@gmail.com.

